

AUX SOURCES DE LA R&D : GENESE DES THEORIES DE LA CONCEPTION REGLEE EN ALLEMAGNE (1840-1960)

Pascal Le Masson, Benoit Weil¹

Résumé :

Cet article étudie les sources allemandes de la conception systématique à trois périodes charnières (1850, 1900 et 1950). Il montre que la conception systématique qui apparaît si intuitive et naturelle aujourd'hui résulte de décennies de travaux d'enseignants et d'industriels pour s'extraire des intuitions trompeuses et des effets de fixation propres aux objets inconnus. Ces théories correspondent à des efforts de rationalisation de l'activité de conception à des périodes historiques bien précises (rattrapage industriel de l'Allemagne de la première révolution industrielle ; accompagnement de la seconde révolution industrielle ; rationalisation du travail d'esprit dans la RDA d'après-guerre). Alors que les sciences de l'ingénieur modélisent les objets existants, les théories de la conception guident le raisonnement sur des objets encore inconnus à l'aide des objets connus. Ces formalismes ne cherchent pas l'innovation singulière mais l'efficacité des capacités de conception. Ils peuvent s'évaluer en fonction de la variété des situations de conception qu'ils couvrent (pouvoir génératif) et des capacités qu'ils exigent de leurs utilisateurs (pouvoir conjonctifs). La conception systématique apparaît comme le formalisme ayant un pouvoir génératif et un pouvoir conjonctif particulièrement forts.

Abstract :

In this paper we analyse the German sources of systematic design at three key historical moments (1850, 1900, 1950). Systematic design appears today very natural and intuitive. We show that it results from decades of efforts made by teachers and engineers to free themselves from misleading intuitions and fixation effects inherent to unknown objects. These theories correspond to rationalization of design activity at specific historical periods (German catching up the first industrial revolution in 1850s, support the second industrial revolution around 1900s and rationalization of spirit work in DDR 1950s). While engineering sciences model known objects, these engineering design theories guide reasoning on unknown objects with the help of the known. These formal model don't aim at single innovation but at improving collective design capacities. Their performance is related both to the variety of situations they can address (generative power) and to the capacities required from the designer using them (conjunctive power). Systematic design appears historically as the formalism that had the best generative and conjunctive powers.

¹ Cette recherche et cette publication ont bénéficié du soutien du programme ANR Entreprise dans le cadre du projet RITE (ANR-07-ENTR-011-RITE) et de la chaire théorie et méthodes de la conception innovante. Nous remercions tout particulièrement Mme Maisonneuve, responsable du fond ancien de la bibliothèque de MINES ParisTech. Nous remercions particulièrement Ulrich Wengenroth pour ses précieux commentaires.

Introduction

Pour concevoir un produit ou un service, la conception dite systématique est aujourd'hui le mode de raisonnement le plus courant, utilisé dans la plupart des bureaux d'études. L'ouvrage de référence de Pahl et Beitz² et ses dérivés ont servi à former des générations d'ingénieurs-concepteurs. Ils ont contribué à diffuser l'idée que toute conception comporte des phases dont les intitulés sont bien identifiés (design fonctionnel, design conceptuel, mise en organes, conception détaillée). A tel point que rares sont les concepteurs qui pensent encore avoir recours là à une théorie de la conception particulière. Son apparente évidence masque son caractère théorique et contingent. Or l'innovation contemporaine exigerait plutôt d'engager un dialogue avec la théorie de la conception systématique ; sur certains sujets d'innovation l'action collective est difficile dans le cadre de la conception systématique mais sortir de ce cadre l'est tout autant... Comprendre la genèse de la conception systématique c'est peut-être se donner les moyens de mieux penser les relations qu'elle peut entretenir avec une conception innovante. Plus généralement, comprendre la genèse des théories passées, c'est aussi comprendre la façon dont des théories de la conception se sont progressivement imposées dans les logiques d'action des concepteurs, comprendre leur nature et leur objet. Les théories de la conception suscitent ainsi trois types de question :

- 1) Des questions sur leur raison d'être, leur origine : qu'est ce qui les a suscitées ? Qui les a produites ? Deux approches sont souvent opposées : s'agissait-il pour les auteurs de « décrire » des pratiques en place (les théories seraient descriptives) ? ; ou bien ces auteurs cherchaient-ils à imposer des modes de pensée issus de recherches formelles (les théories seraient plutôt normatives) ?
- 2) Quel en était l'objet ? Cette question peut paraître surprenante ; pourtant, dans le cas de la conception, le doute est possible : s'agit-il d'une théorie des machines, des forces, du mouvement, de la mécanique ? ou bien s'agit-il d'une « théorie de la méthode », et dans ce cas où réside la spécificité de la théorie par rapport, par exemple, aux travaux portant sur la méthode expérimentale, sur l'épistémologie, sur la logique, les méthodes d'optimisation ou de résolution de problème ?
- 3) Quel est le rapport entre les théories de la conception et l'innovation ? Ces théories visent-elles à permettre l'innovation ou à contrôler le processus de conception ?

Pour travailler sur ces questions, nous avons adopté une démarche « généalogique » en recherchant autant que possibles les sources historiques mentionnées par les auteurs de théories ou de méthodes de conception de machines. A partir de la brève histoire des théories de la conception figurant dans l'ouvrage de Pahl et Beitz nous avons progressivement identifié les principaux auteurs de théories de la conception dans le domaine de la conception de machines. Ces travaux se sont trouvés largement confinés à l'Allemagne, et nous avons limité nos recherches à ce périmètre. Nous nous sommes également appuyés sur les travaux de plusieurs historiens

² Gerhard Pahl and Wolfgang Beitz, *Konstruktionslehre* (English title : *engineering design*), ed. édition anglaise : Ken Wallace, trans. Ken Wallace Arnold Pomerans (Heidelberg, version anglaise : London: Springer Verlag, édition anglaise : The Design Council, 1977)

allemands des théories de la conception, Wolfgang König³ et Matthias Heymann⁴, ainsi que Klaus Mauersberger sur Bach⁵ et Dietrich Severin sur Reuleaux⁶), nous avons pu consulter les manuels (en langue allemande ou française) des principaux professeurs allemands du 19^{ème} siècle (Redtenbacher⁷, Reuleaux⁸, Grashof, Bach, Laudien) et du 20^{ème} siècle (Findeneisen, Tschochner, Hansen, Bischoff et Bock, Rodenacker, Roll, Koller, Pahl et Beitz,...⁹), quelques travaux français en conception de machine datant du début du 19^{ème} siècle (Hachette¹⁰, Poncelet¹¹, Morin¹², Carnot¹³, Dupin¹⁴...) et certains

³ Wolfgang König, *Künstler und Strichezieher. Konstruktions- und Technikkulturen im deutschen, britischen, amerikanischen und französischen Maschinenbau zwischen 1850 und 1930*, Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, vol. 1287 (Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag, 1999)

⁴⁴ Matthias Heymann, *"Kunst" und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts. Zur Geschichte der Konstruktionswissenschaft* (Zürich: Chronos Verlag, 2005)

⁵ Klaus Mauersberger, "Die "Maschinen-Elemente Carl von Bachs - ein Standardwerk des Maschinenbaus," in *Carl Justus von Bach (1847-1999, von der Bauakademie zur Technischen Universität Berlin, Geschichte und Zukunft. Eine Ausstellung der Technischen Universität Berlin aus Anlass des 200. Gründungstages der Bauakademie und des Jubiläums 100 Jahre Promotionsrecht der Technischen Hochschulen* (Berlin: Ernst und Sohn, 2000), 300-304 (1931) - *Pionier-Gestalter-Forscher-Lehrer-Visionär*, ed. Friedrich Naumann (Stuttgart: Verlag Konrad Wittwer GmbH, 1998), 155-168

⁶ Dietrich Severin, "Franz Reuleaux, der Wissenschaftler und Ingenieur," in *1799-1999, von der Bauakademie zur Technischen Universität Berlin, Geschichte und Zukunft. Eine Ausstellung der Technischen Universität Berlin aus Anlass des 200. Gründungstages der Bauakademie und des Jubiläums 100 Jahre Promotionsrecht der Technischen Hochschulen* (Berlin: Ernst und Sohn, 2000), 300-304

⁷ Ferdinand Redtenbacher, *Resultate für den Maschinenbau*, 2^{ème} édition ed. (Friedrich Bassermann, 1852). Ferdinand Redtenbacher, *Theorie und Bau der Wasser-Räder*, 2^{ème} édition (1^{ère} édition 1846) ed. (Mannheim: Bassermann, 1858). F. Redtenbacher, *Résultats scientifiques et pratiques destinés à la construction des machines*, Traduction française à partir de la quatrième édition allemande de l'ouvrage "Resultate für den Maschinenbau" (1848) ed. (Mannheim, Paris: F. Bassermann (Mannheim), E. Lacroix (Paris), 1861). Ferdinand Redtenbacher, "Bericht über die Feier seines 100. Geburtstages an der Groosh. Technischen Hchschulen Fridericiana zu Karlsruhe," in *26; Juni 1909* (1909)

⁸ Franz Reuleaux and C. L. Moll, *Constructionslehre für den Maschinenbau, erster Band : die Construction der Maschinenteile* (Braunschweig: Fridrich Vieweh und Sohn, 1862). Franz Reuleaux, *Cinématique, Principes fondamentaux d'une théorie générale des machines*, trans. A. Debize, Edition française traduite de l'allemand ed. (Librairie F.Savy, 1877)

⁹ Findeneisen, F. (1950). *Neuzeitliche Maschinenelemente*, Schweizer Druck- und Verlaghaus AG, Zürich. p., 3 ; Tschochner, H. (1957). *Construire et réaliser, manuel de l'ingénieur d'études (industries mécaniques)*, Traduit de l'allemand par Constant Bohn, translator, Editions Eyrolles, Paris. 255 p., Konstruieren und Gestalten, 1954, Verlag W. Girardet, Essen ; Rodenacker, W. G. (1970). *Methodisches Konstruieren*, Konstruktionsbücher, K. Kollman, Springer Verlag, Berlin. 233 p. ; Pahl, G., and Beitz, W. (2006). *Engineering design, a systematic approach*, K. Wallace, L. Blessing, et F. Bauert, translator, Springer, Berlin. 544 p., Koller, R. (1998). *Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen.*, 4., neubearbeitete und erweiterte Auflage., Springer, Berlin. 692 p., Hansen, F. (1955). *Konstruktionssystematik, eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure*, VEB Verlag Technik, Berlin. 39 p., Roth, K. (1982). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*, Springer Verlag, Berlin. xvi + 475 p.,

¹⁰ Hachette, Lanz, and Betancourt, *Programme du cours élémentaire des machines suivi de essai sur la composition des machines* (Paris: Ecole Impériale Polytechnique, 1808)

¹¹ Ch. de Comberousse, "Notice sur l'introduction à la mécanique industrielle et sur le cours de mécanique appliquée aux machines de J.-V. Poncelet," *Nouvelles Annales de Mathématiques* 13, no. 2 (1874): 5-16. Jean-Victor Poncelet, *Mémoire sur les roues hydrauliques à aubes courbes mues par -dessous, suivi d'expériences sur les effets mécaniques de ces roues, nouvelle édition revue et corrigée et augmentée d'un second mémoire sur des expériences en grand relatives à la nouvelle roue contenant une instruction pratique sur la manière de procéder à son établissement*, 2^{ème} édition ed. (Metz: Thiel, 1827)

travaux anglais (Smeaton¹⁵, Babbage¹⁶,...) voire américains (Evans¹⁷), les articles de journaux et les ouvrages publiés par les professeurs (Riedler¹⁸, Erkens¹⁹, Kesselring²⁰, Neuhaus²¹, Klimentitsch von Engelmeyer²², Hansen²³, Rodenacker²⁴,...). Pour Redtenbacher nous avons également mobilisé plusieurs biographies²⁵. En outre nous avons étudié le contexte industriel de l'époque et les grandes entreprises avec lesquelles beaucoup de ces professeurs étaient en relation²⁶.

¹² Morin, A. (1836). *Expériences sur les roues hydrauliques à aubes planes et sur les roues hydrauliques à augets* Madame Thiel, Metz. xv + 133 + 3pl p., Morin, A. (1838). *Aide-mémoire de mécanique pratique à l'usage des officiers d'artillerie et des ingénieurs civils et militaires*, Madame Thiel, Metz. 338 p.,

¹³ Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, nouvelle édition de 1990 aux éditions Jacques Gabay, Sceaux. ed. (Paris: Bachelier, 1824)

¹⁴ Charles Dupin, *Géométrie et mécanique des arts et métiers et des beaux-arts. Cours normal à l'usage des Artistes et des Ouvriers, des Sous-Chefs et des Chefs d'ateliers et de manufactures*, 3 vols., vol. 1 à 3 (Paris: Bachelier, 1825)

¹⁵ John Smeaton, *Recherches expérimentales sur l'eau et le vent, considérés comme forces motrices, applicables aux moulins et autres machines à mouvement circulaire, suivies d'expériences sur la transmission du mouvement et la collision des corps*, trans. P. S. Girard, Edition française ed. (Paris: Courcier, 1810)

¹⁶ Charles Babbage, *Reflections on the Decline of Science in England and Some of its Causes* (London: B. Fellowes, 1830)

¹⁷ Oliver Evans, *The Abortion of the Young Steam Engineer's Guide* (Philadelphia: Printed for for the author by Fry and Krammerer, 1805)

¹⁸ Aloïs Riedler, "Amerikanische technische Lehranstalten," *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* 38 (1894): 405-409, 507-514, 608-615, 629-636. Aloïs Riedler, *Emil Rathenau, und das Werden der Grosswirtschaft* (Berlin: Verlag von Julius Springer, 1916)

¹⁹ A. Erkens, "Beiträge zur Konstrukteurserziehung," *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* 72, no. 1, 7. Jan 1928 (1928): pp. 17-21

²⁰ Fritz Kesselring, "Die "starke" Konstruktion, Gedanken zu einer Gestaltungslehre," *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* 86, no. 21/22 30. Mai 1942 und 49/50 12. Dez. 1942 (1942): pp. 321-330 und 749-752

²¹ F. A. Neuhaus, "Der Einfluss des technischen Bureaus auf die Fabrikation," *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* 48, no. 33 (1904): 1221-1225. F. Neuhaus-Tegel, "Wirtschaftliches Denken und konstruktive Tätigkeit," *Werkstattstechnik* Juni 1909 (1909): 293-302. F. A. Neuhaus, "Technische Erfordernisse für Massenfabrication," *Technik und Wirtschaft, Monatsschrift des VDI* 3, no. 10 (1910): 577-597 & 649-660

²² Peter Klimentitsch von Engelmeyer, "Was ist eine Erfindung?," *Civilingenieur* 41 (1895): 282-300

²³ Friedrich Hansen, "Konstruktionssystematik, ein neuer Weg zur Ingenieurserziehung," *Feingerätetechnik* 1960 (1960): 44-51. Friedrich Hansen, "Grenzen und Wirkungsbereich der Konstruktionssystematik bei Forschungs- und Entwicklungsaufgabe," *Feingerätetechnik* 1961, no. 10 (1961): 452-460

²⁴ Wolf G. Rodenacker, *Methodisches Konstruieren*, ed. K. Kollman, Konstruktionsbücher (Berlin: Springer Verlag, 1970)

²⁵ Walther Peter Fuchs, "Die geschichtlich Gestalt Ferdinand Redtenbachers," *Zeitschrift für die Geschichte des Oberrheins* 107 (1959): 205-222. Franz Grashof, "Redtenbacher's Wirken zur wissenschaftlichen Ausbildung des Maschinenbaues," in *Fest-Rede zur Enthüllungs-Feier des Denkmals Ferdinand Redtenbacher's*, ed. Bassermann (1866). K. Keller, "Zum Gedächtnis Redtenbachers," *Bayerisches Industrie- und Gewerbeblatt* 96, no. 36 & 37 (1910): 351-355 & 363-367. Emil Kretzschmann, "Ferdinand Redtenbacher," *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* 9 (1865): 246-262. Rudolf Plank, "Fakultät für Maschinenwesen "die Abteilung für Maschinenbau", *Die technische Hochschule Fridericiana Karlsruhe, Festschrift zur 125-Jahrfeier* (1950): 222-226

²⁶ A.E. Musson and Eric Robinson, *Science and Technology in the industrial revolution* (Manchester: Manchester University Press, 1969). Charlotte Peter, "Hans-Caspar Escher (1775-1859)," in *Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik*, ed. Verein für wirtschaftshistorische Studien (Zürich: Wetzikon,

Par ailleurs, afin de comparer et de comprendre les évolutions progressives des théories nous nous sommes référés à un modèle général du raisonnement de conception, la théorie C-K²⁷. Il a été montré que ce formalisme rend compte de la conception systématique tout en étant plus large. Ce cadre formel nous a permis d'analyser les efforts et les élaborations théoriques qui ont contribué à l'émergence progressive de la conception systématique. La théorie C-K distingue l'espace des connaissances (K), l'ensemble des propositions ayant un statut logique (et en particulier les connaissances scientifiques, les savoir-faire,...), et l'espace des concepts (C), l'espace des propositions sans statut logique (à commencer par les propositions servant à décrire les objets –produits, services,...- qu'il y a à concevoir). Tout processus de conception consiste à ajouter au concept des attributs issus de K jusqu'à ce que la phrase ainsi formée ait un statut logique. Quatre opérateurs sont mobilisés en cours de processus : de C dans K (la concept suggère d'activer des connaissances dans K), de K dans C (des propriétés connues, dans K, sont mobilisées pour raffiner le concept), de K dans K (des connaissances sont déduites des connaissances existantes), de C dans C (le concept se structure en sous ensembles consistants).

Toute théorie de la conception peut alors s'interpréter comme une classe particulière de la théorie C-K, précisant certaines structures dans l'espace des connaissances (modélisation objets, structuration de la connaissances en métiers, en disciplines, structure entité-relation, type de logique,...), certaines structures de C ou des structures des opérateurs (opérateurs de décision, d'évaluation, créativité,...). Ainsi la conception systématique telle qu'elle est décrite par Pahl et Beitz consiste à distinguer plusieurs langages successifs sur l'objet (langages fonctionnel, conceptuel, physico-morphologique,...) de sorte que concevoir en conception systématique consiste à utiliser pas à pas certains types de connaissances (connaissances sur la demande, sur les fonctions, sur les grands principes techniques,...) pour raffiner l'objet en cours de conception. Dans la théorie C-K la conception systématique au sens de Pahl et Beitz prendrait la forme (très simplifiée) ci-dessous. La théorie est donc à la fois une théorie des structures de K (les langages), de celle de C (étalement des raffinements

1956), 9-30. Peter Poschenrieder, "Erinnerungen aus der Werdezeit der Elektrotechnik," *Geschichtliche Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik* 3 (1932): 89-125. Friedrich Heintzenberg, "Von der Werkstatt zur Fabrik," *Technikgeschichte* 29 (1950): 121-131. Friedrich Heintzenberg, "Friedrich von Hefner-Alteneck," *Abhandlungen und Berichte des deutschen Museums* 19, no. 2 (1951): 3-35. Georg Siemens, *L'Evolution de l'électrotechnique : Histoire de la maison Siemens. 1, L'époque de la libre entreprise. 1847-1910*, III vols., vol. vol.1, L'époque de la libre entreprise. 1847-1910 (Colmar: Alsatia, 1961). Ferdinand Trendelenburg, *Aus der Geschichte der Forschung im Hause Siemens*, Geschichte in Einzeldarstellungen, Verein Deutscher Ingenieure, Nr 31 (Düsseldorf: VDI-Verlag, 1975). Peter Behringer, "Ingenieure und Techniker. Technische Angestellte in Grossbritannien im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert," in *Angestellte im europäischen Vergleich. Die Herausbildung angestellter Mittelschichten seit dem späten 19. Jahrhundert (Geschichte und Gesellschaft, Zeitschrift für historische Sozialwissenschaft, Sonderheft 7)*, ed. Jürgen Kocka (Göttingen: 1981), 74-93. Lothar Schoen, "Friedrich von Hefner-Alteneck," in *Techniker*, ed. Wilhelm Treue and Wolfgang König (Berlin: Einzelveröffentlichungen der historischen Kommission zu Berlin 60. Berlinische Lebensbilder 6, 1990), 227-247. Ulrich Wengenroth, "Emil Rathenau," in *Techniker*, ed. Wilhelm Treue and Wolfgang König (Berlin: Einzelveröffentlichungen der historischen Kommission zu Berlin 60. Berlinische Lebensbilder 6, 1990), 193-209

²⁷ Armand Hatchuel and Benoit Weil, "La théorie C-K : fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception," in *Colloque sciences de la conception* (Lyon, 15-16 mars 2002: 2002). Armand Hatchuel and Benoit Weil, "A new approach of innovative design: an introduction to C-K theory," in *ICED'03, August 2003* (Stockholm, Sweden: 2003), 14. Armand Hatchuel and Benoit Weil, "C-K design theory: an advanced formulation," *Research in Engineering Design* 19 (2009): 181-192

progressifs) et des opérateurs (divergence, évaluation et sélection à chacun des niveaux).

Le formalisme permet ainsi de discuter des éléments critiques apportés progressivement par les théories proposées : les efforts portent-ils plutôt sur les structures de K ? Ou de C ? Ou des opérateurs ?

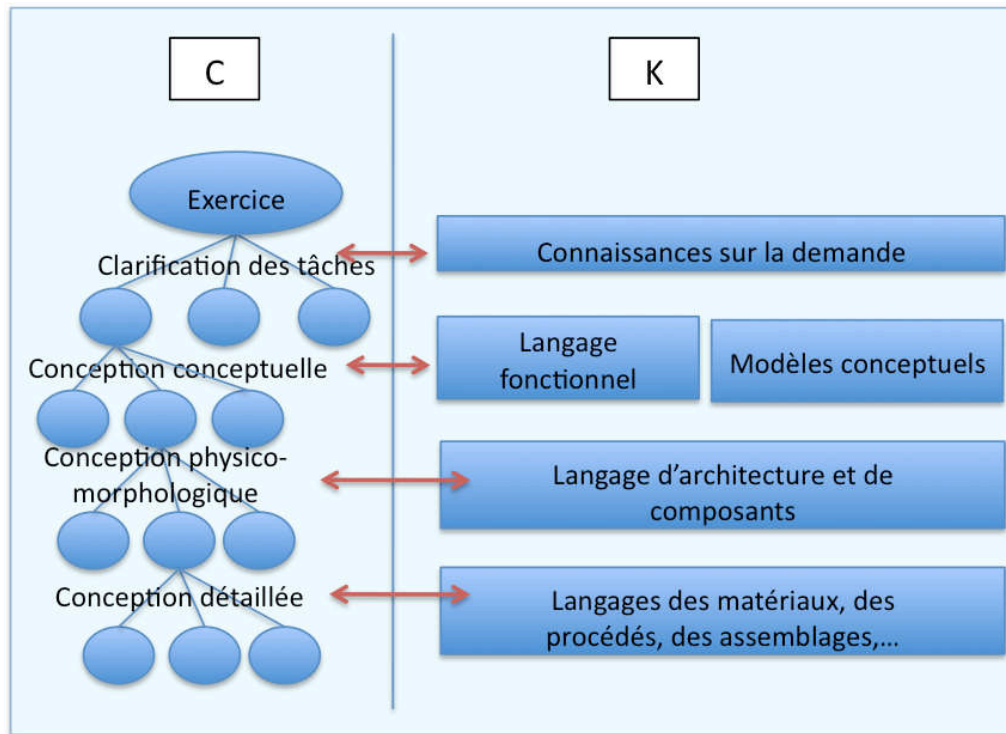


Figure 1 : La conception systématique représentée dans le formalisme C-K.

Le travail sur la genèse de la conception systématique nous a conduits à quatre résultats principaux :

- 1- Alors que la conception systématique semble naturelle et évidente aujourd'hui, sa genèse révèle la complexité, la sophistication progressive et l'effort intellectuel qu'elle a nécessités. Trois phases principales se dégagent, marquées par des crises parfois violentes entre des partis contrastés.
- 2- Concernant les motifs : ces théories ne sont ni purement normatives ni purement descriptives mais elles combinent ces deux propriétés et correspondent à des rationalisations de la conception, les propositions théoriques émanant toujours de professeurs en lien étroit avec l'industrie et, parfois, en lien avec les autorités publiques.
- 3- Concernant l'objet : il semble que l'effort théorique a généralement porté sur la façon de décrire des objets inconnus (langages de l'inconnu) en utilisant la connaissance des objets existants (langage du connu). La question à laquelle répondent ces théories pourrait être formulée ainsi : comment stabiliser un (ou plusieurs) langage(s) des objets qui n'existent pas encore, en lien avec les connaissances qui sont disponibles ou qui peuvent être produites par la science de l'époque ?

- 4- Concernant l'innovation : l'effort théorique ne vise pas le « nouveau produit » ou « l'innovation » qu'elle soit radicale ou incrémentale ; elle vise à rendre efficace des capacités de conception dans un nombre croissant de situations de conception. Les méthodes seront d'autant meilleures qu'elles s'appliqueront à un ensemble de situations de conception important (pouvoir génératif) et qu'elles seront utilisables par des concepteurs sans capacités extraordinaires (pouvoir conjonctif).

L'article étudie trois moments critiques de l'histoire de la conception systématique : dans une première partie nous revenons aux origines des théories de la conception de machine, la première théorie du *Maschinenbau*, pour comprendre ce qui a constitué leur rupture essentielle : la distinction d'un langage de l'inconnu permettant de mobiliser les connaissances sur les objets connus pour la conception d'objets encore partiellement connus. Dans une seconde partie nous évoquerons le mouvement anti-mathématique de la fin du 19^{ème} siècle qui a cherché à intégrer la production de connaissances au raisonnement de conception et qui conduira à la naissance des éléments de machine. Dans une dernière partie nous étudierons l'émergence, au milieu du 20^{ème} siècle, de la conception systématique proprement dite, née du besoin de rationaliser le travail intellectuel.

I. Aux origines du Maschinenbau allemand : la méthode des rapports, un premier modèle génératif (Redtenbacher 1850)

Pour Pahl et Beitz, le premier auteur d'une théorie de la construction de machine serait Ferdinand Redtenbacher. Ce professeur allemand est pourtant nettement moins connu que de grands concepteurs de machines comme Watt et Boulton, des scientifiques spécialistes des machines à l'Ecole Polytechnique comme Monge, Hachette, Lanz et Betancourt²⁸, ou des scientifiques parfois anciens élèves de cette même école comme Carnot²⁹, Dupin³⁰ ou Poncelet³¹. Qui était donc Redtenbacher ? Pourquoi a-t-il été conduit à formuler une théorie du *Maschinenbau* et en quoi cette théorie diffère-t-elle de ce qu'avaient proposé ces illustres ingénieurs ?

I.A. Redtenbacher et les enjeux socio économique : les chemins du rattrapage industriel ?

Ferdinand Redtenbacher (1809-1863) fils d'un négociant en fer, entre à 15 ans dans l'administration royale impériale de la direction des constructions de Linz comme assistant pour les plans de construction et les relevés géodésiques sur les rives du Danube. A 16 ans il entre au polytechnicum de Vienne où il passe 4 ans. La formation de l'époque s'adresse à des enfants ayant plus de 13 ans, qui suivent 2 ans de formation générale puis 2 ans de spécialisation en mathématiques, physique, architecture, construction de bâtiments et de machines. Seules deux écoles de ce type existent alors

²⁸ Hachette, Lanz et Betancourt, 1808, op. cité.

²⁹ Carnot, 1824, op. cité.

³⁰ Dupin, 1825op. cité.

³¹ Poncelet, 1827, op. cité.

dans l'empire, l'une à Vienne et l'autre à Prague³². Il devient ensuite assistant du professeur de machines, Arzberger. En 1833, à 24 ans, il est nommé à l'Ecole Polytechnique de Zurich comme professeur de mathématiques et de dessins géométriques (au sens du cours de géométrie descriptive de Monge donné à l'Ecole Polytechnique depuis 1795). C'est une école industrielle qui a pour vocation de former des techniciens à l'utilisation des machines modernes présentes dans les manufactures de l'époque.

A Zurich il rencontre le directeur de la fabrique de machines Escher-Wyss, Hans Caspar Escher et son fils Albert. Quelques sources³³ nous permettent de donner les éléments suivants sur l'entreprise Escher-Wyss à cette époque : architecte de formation, inventeur d'une mule originale, Hans Caspar Escher avait créé, en 1805, sa propre filature dans le canton de Zurich (avec l'aide de son banquier Salomon von Wyss). Il installe ses propres roues hydrauliques, ses ateliers et ses métiers à tisser construits sur son concept de mule. Grâce au blocus continental, la Suisse est protégée des importations du Lancashire et l'entreprise est florissante, comptant 200 ouvriers en 1810. Egalement protégées par le blocus, les activités d'ingénierie s'accroissent et l'entreprise fabrique bientôt des pompes et des corn mills, crushing mills et paper mills. A la fin de l'Empire Escher entreprend un voyage d'étude en Grande Bretagne pour étudier la concurrence à venir. Il rencontre les principaux constructeurs de machines de l'époque. Dans les années qui suivent, après un nouveau voyage en Angleterre et en Ecosse en 1823, il décide de développer un atelier de prototypage (Musterwerk) et se renseigne sur les roues hydrauliques et les systèmes d'entraînement les plus performants de l'époque. L'entreprise fait alors l'acquisition des machines à vapeur de l'entreprise de William Fairbairn, considérée comme l'une des plus innovantes de l'époque. Les machines seront livrées en 1826. William Fairbairn (1789-1874), un des spécialistes de la construction métallique, est reconnu pour ses travaux de recherche expérimentale sur les roues hydrauliques les millworks et la construction navale. En 1852 Fairbairn sera correspondant de l'Institut « pour ses recherches expérimentales entreprises en vue d'éclaircir la science de la construction » (comme le dira Poncelet lui-même). Dans les années qui suivent Escher continue de développer les activités d'ingénierie. En 1826, son fils Albert, de retour de deux années de formation dans les ateliers de Fairbairn, en prend la direction. Les ateliers emploient alors 16 personnes ; ils seront une centaine en 1832, 400 en 1835. Cette année-là les profits de la partie construction de machine sont trois fois ceux de la filature. En 1835, l'entreprise réalise son premier bateau à vapeur en fer. En 1837 sa première machine à vapeur à mouvement alternatif. En 1840 sa première turbine. La réputation de l'entreprise était telle que le Manchester Guardian a pu écrire en 1845 que « nulle part en Angleterre on ne peut acquérir une aussi bonne éducation technique que sous la direction de Caspar Escher aux Neumühle de Zürich »³⁴.

³² Fuchs, 1959, op. cité.

³³ Voir Musson et Robinson 1969, op. cité, Peter, 1956, op. cité. Voir aussi W.O. Henderson, *Industrial Britain under the Regency, 1814-1818. The Diaries of Escher, Bodmer, May and de Gallois 1814-18*, Economic History (Routledge, 1968). Samuel Smiles, *James Brindley and the early engineers* (Warwickshire, England: TEE Publishing, 1874). Franz H. Hoigné, "Gründung und Entwicklung der Spinnerei und Maschinenfabrik Escher-Wyss & Cie, 1805-1859" (Zürich, 1916)

³⁴ cité par Henderson, 1968, op. cité.

Chez Escher-Wyss, Ferdinand Redtenbacher est donc au contact de la haute technologie de l'époque³⁵, dans une entreprise qui cherche à imiter voire dépasser ses concurrents de Grande Bretagne. Avec Hans Caspar et Albert Escher et leurs ingénieurs Joseph Trick, Mortz Schröter et George Veith, Redtenbacher conduit plusieurs campagnes d'observations, procède à des essais et relève un ensemble d'indications essentielles pour le fonctionnement pratique des machines. Il constitue ainsi un corpus d'études, d'enregistrements, d'esquisses et de calculs sur les différentes machines de l'entreprise (roues hydrauliques, turbines, machines à vapeur terrestres et navales,...).

En 1841, après huit années passés à Zurich, Redtenbacher répond à l'appel du gouvernement du grand duché de Bade pour devenir professeur de machine à l'école polytechnique de Karlsruhe nouvellement créée. A cette époque le grand duché de Bade (environ 1 million d'habitants vers 1840 dont 25 000 à Karlsruhe) est loin d'être une puissance industrielle mais connaît une forte croissance. Alors qu'en 1832, lors de la première exposition régionale, on ne comptait que 32 exposants présentant quelques instruments mécaniques, une pompe à feu manuelle et des process de métallisation, l'exposition de 1842 comporte pour la première fois une machine à vapeur et en 1843 le premier chemin de fer relie Karlsruhe à Heidelberg. L'Etat, notamment par la voie de l'un de ses grand commis, Karl Friedrich Nebenius (1784-1857), s'est lancé dans une politique volontariste de développement économique³⁶. Nebenius, qui a rédigé la constitution de Bade en 1818, contribue au développement des infrastructures (port de Mannheim, chemin de fer Mannheim-Baal) et à l'entrée du grand duché dans l'alliance douanière du Zollverein.

A côté de ces formes plutôt classiques de l'action publique pour le développement économique, Nebenius porte un intérêt tout particulier à l'enseignement, qu'il voit comme *une forme d'action en faveur de la croissance industrielle*. Ainsi à partir de 1825, il mène une profonde réforme de l'enseignement, qui conduit à la création, en 1832, d'une école polytechnique unique regroupant les écoles d'ingénieur, de construction, des arts et métiers, de commerce et des postes. Cette école veut suivre le modèle de l'Ecole Polytechnique, en donnant des bases mathématiques et scientifiques à un enseignement pratique des arts et métiers (éléments de machines, étude descriptives des machines et étude des maquettes). A l'époque les succès anglais enseignent que c'est l'expérience pratique qui permet l'invention et les usines badoises se procurent des machines anglaises qu'elles se contentent d'améliorer en fonction de leurs besoins. Pour Nebenius, l'exemple de l'Ecole Polytechnique conduit à penser que des bases théoriques solides sont aussi une façon de structurer un tissu industriel. C'est pour créer un enseignement

³⁵ Voir Kretzschmann, 1865, op. cité.

³⁶ C'est un mouvement général dans les états allemands, comme le note König. Les Länder entreprennent avant et après les guerres napoléoniennes de lancer l'industrialisation associée à la révolution anglaise. Les Länder allemands ne sont pas à proprement parler des pays « sous-développés » : au 18^{ème} siècle ils constituent une réelle puissance industrielle. Mais les dirigeants considèrent que leurs états prennent du retard dans les « nouvelles technologies », i.e. celles de la révolution industrielle anglaise. Ils organisent des voyages d'information, encouragent les séjours longs en Grande Bretagne, achètent des machines anglaises qu'ils présentent dans des expositions ou des Musterbetrieb (des entreprises-modèles), ils soutiennent les Gewerbevereine (associations industrielles) qui organisent des congrès ou des journaux sur les dernières techniques de Grande Bretagne. Dans ces années apparaissent de nouvelles écoles techniques : Prague 1806, Vienne 1815, Berlin 1821, Karlsruhe, 1825, Munich 1827, Dresde 1828, Stuttgart 1829, Hannover 1831, Braunschweig 1835, Darmstadt 1836. Dans une seconde période seront créées les écoles d'Aix la Chapelle 1870, Danzig 1904 et Breslau 1910.

de machine adapté à ces exigences que Redtenbacher est embauché. Sa carrière ultérieure témoigne d'un certain succès : en 1861 Redtenbacher est directeur du Polytechnicum et conseiller de la cour grand-ducale de Bade.

Dès son arrivé à Karlsruhe, Redtenbacher développe un enseignement original, loin des approches descriptives traditionnelles³⁷. C'est cet enseignement qui donnera lieu, quelques années plus tard à ses ouvrages sur « les principes du Maschinenbau ». On peut en conclure que ce cours a été très largement préparé lors de son séjour à Zurich et qu'il n'est pas sans lien avec ses contacts avec Escher-Wyss. Quel est le contenu de cet enseignement ?

I.B. La méthode des rapports : des abaques pour décrire les objets qui n'existent pas à partir des connaissances disponibles

I.B.1- L'ambition : élaborer un modèle de formation original, distinct du modèle anglais et du modèle français.

Dans la préface de son ouvrage de 1848, Resultate für den Maschinenbau, Redtenbacher précise son ambition : une école comme le Polytechnicum doit former non des ouvriers ou des contremaîtres mais des dessinateurs, des constructeurs (concepteurs), des ingénieurs et des responsables d'usine. Cette formation ne pourra pas suivre le modèle anglais. Comme l'explique Redtenbacher : « Nous, sur le continent, n'avons ni les ressources financières, ni cette large expérience dans l'exercice de toutes les spécialités pour pouvoir suivre le chemin d'un empirisme pur. Nous sommes donc contraints de remplacer ou de supporter l'argent manquant et l'expérience limitée par la force intelligente et l'unité scientifique »³⁸. La formation des ingénieurs est donc perçue comme le chemin du rattrapage industriel.

Ce chemin du rattrapage est déjà celui que voulaient emprunter les ingénieurs, scientifiques et professeurs français. Ainsi Charles Dupin, professe ainsi au conservatoire des arts et métiers un cours de « Géométrie et mécanique des arts et métiers et des beaux-arts. Cours normal à l'usage des Artistes et des Ouvriers, des Sous-Chefs et des Chefs d'ateliers et de manufactures » (op. cité). Jean-Victor Poncelet, polytechnicien (1807) donne un cours d'introduction à la mécanique industrielle à l'Ecole du génie de Metz (Mézière, Ecole d'Application de l'Ecole Polytechnique) (première édition, 1828). Comme l'explique de Comberousse, l'enseignement de Poncelet remonte aux travaux de Bernoulli, Borda, Carnot, Navier ou de ses camarades de l'X, Petit, Burdin, Coriolis, Belanger ; il enseigne la « mécanique industrielle », i.e. « la science du travail des forces ». C'est le « principe général des forces vives » ou celui de la transmission du travail qui doit dominer tout l'enseignement. Il s'agit de « répandre

³⁷ Voir Planck, 1959, op. cité. Par ailleurs Fuchs (Fuchs, 1959, op. Cité) précise qu'en novembre 1840 Redtenbacher vient à Karlsruhe et précise ses conditions pour prendre son nouveau poste : « 1- que me soient confiées les cours suivants : a) Mécanique scientifique générale, cours de 4h hebdomadaire, b) théorie générale des machines c) enseignement spécial de machines ; 2- que me soit confiée la direction de l'atelier de mécanique ainsi que la conservation de la collection de modèles » (30/11/840) (notre traduction).

³⁸ Cité par Fuchs : "wir auf dem Kontinent haben wir weder Geldkräfte noch diesen Umfang an Erfahrungen in der Ausführung aller Spezialitäten, um den rein empirischen Weg ausschliesslich verfolgen zu können, und sind daher gezwungen, durch intelligente Kraft und wissenschaftliche Einheit das mangelnde Geld und die eingeschränkte Erfahrung zu ersetzen oder zu unterstützen" (traduction des auteurs). Ce texte est extrait de : « Die polytechnische Schule, in : Die Residenzstadt Karlsruhe, Festgabe zur 34. Versammlung deutsche Naturforscher u. Ärzte, Karlsruhe 1858, p. 125.

dans la classe industrielle, tout en les lui rendant familières, des doctrines d'une utilité incontestable qu'elle ne peut ignorer sans préjudice et qui, autrefois, étaient presque exclusivement le partage d'un petit nombre d'ingénieurs ». Le cours comporte deux parties : d'une part les principes fondamentaux (principes généraux de l'équilibre et du mouvement,...) et d'autre part « les résistances que les corps opposent à l'action directe des forces » (frottement, résistance à la traction, compression et à la rupture,...). Le cours enseigne donc les grands modèles théoriques puis, dans cette logique de modélisation, les modalités qui expliquent l'écart entre le modèle et les phénomènes réels³⁹. Il vise donc un rattrapage par la science (plus précisément : la mise à disposition du plus grand nombre des résultats des sciences mécaniques).

Ces enseignements sont certainement connus de Redtenbacher⁴⁰. Mais il s'en écarte volontairement. C'est certainement à ce type de cours qu'il pense lorsqu'il écrit dans sa préface aux « *Resultate für den Maschinenbau* » une phrase que nous avons dû traduire par nous-même : « Avec les principes de la mécanique, on n'invente pas de machine, car pour cela il faut aussi, à côté d'un talent d'invention, une connaissance exacte du processus mécanique auquel la machine doit servir. Avec les principes de la mécanique on ne peut apporter une esquisse de machine car pour cela il faut aussi un sens de la composition, de la disposition et de la mise en forme. Avec les principes de la mécanique on ne peut réaliser aucune machine car pour cela il faut des connaissances pratiques des matériaux à travailler et une familiarité avec la prise en main des outils et la manipulation des machines. Avec les principes de la mécanique on ne mène pas d'affaire industrielle car pour cela il faut une personnalité de caractère et une connaissance des affaires commerciales »⁴¹. Les *Resultate* ont en fait été traduits en français en 1861. La préface de 1848 a elle aussi été traduite, pratiquement dans son intégralité. Mais la phrase ci-dessus ne figure pas dans la traduction française ! Difficile de ne pas y voir en effet une critique sévère du rattrapage par la science, les sciences de la mécanique de l'époque ne pouvant selon lui constituer un enseignement de conception complet.

Le programme de Redtenbacher se précise : 1- il s'agit de donner un enseignement qui permette d'économiser l'apprentissage expérimental ; 2- l'enseignement doit non seulement traiter des connaissances en sciences de la mécanique mais aussi du processus mécanique et des conditions d'utilisation, des questions de composition, de disposition et de mise en forme (i.e. une connaissance proprement architecturale de la

³⁹ Voir de Comberousse, 1874, op. cité et Jean-Victor Poncelet, *Introduction à la mécanique industrielle physique ou expérimentale*, 3ème édition ed. (Paris: Publié par M. Kretz chez Gauthier-Villars, 1870)

⁴⁰ Voir notamment Keller, 1910, op. cité.

⁴¹ « Mit den prinzipien der Mechanik erfindet man keine Maschine, denn dazu gehört, nebst dem Erfindungstalent, eine genaue Kenntnis des mechanischen Prozesses, welchem die Maschine dienen soll; mit den Prinzipien der mechanik bringt an keinen Entwurf einer Maschine zustande, denn dazu gehört Zusammensetzungssinn, Anordnungssinn und Formensinn. Mit den Prinzipien der Mechanik kann man keine Maschine wirklich ausführen, denn dazu gehören praktische Kenntnisse der zu verarbeitenden Materialien und eine Gewandheit in der Handhabung der Werkzeuge und Behandlung der Hilfsmaschinen. Mit den Prinzipien der Mechanik betreibt man kein industrielles Geschäft, denn dazu gehört eine charakterkräftige Persönlichkeit und gehören kommerzielle Geschäftkenntnisse ».

machine⁴²), des matériaux, des procédés et des outils, des questions commerciales... et même des traits personnels du concepteur-entrepreneur !

I.B.2- La méthode des rapports : une méthode pour concevoir en faisant bon usage des connaissances existantes.

Redtenbacher a écrit trois types d'ouvrages : des ouvrages sur des types de machines particuliers (turbines, roues à eau, machines à air chaud, locomotives) ; un manuel de Maschinenbau (Resultate für den Maschinenbau), dont la première édition est de 1848 et qui sera réédité plusieurs fois jusqu'en 1875 et traduit en français. Enfin un ouvrage intitulé « Principien für den Maschinenbau », publié en 1852, qui expose, de façon plus théorique, les bases d'un « enseignement de construction » (Konstruktionslehre). Ces trois types d'ouvrage reprennent, sous des formes différentes, la méthode développée par Redtenbacher, la méthode des rapports.

La méthode part de l'hypothèse que la disposition de la machine est connue dans ses objectifs et son ordonnancement (« die gesamte Maschinenanlage in ihrer Zwecksetzungen und ihrer Anordnung bekannt ist ») et qu'il existe un ensemble de règles, résultant de travaux antérieurs et complété par les soins de l'auteur, concernant l'objet à concevoir. L'enjeu est donc le dimensionnement des pièces, sur la base des connaissances disponibles. La méthode des rapports (Verhältnismethode) consiste à donner les rapports entre les parties (et non pas des valeurs absolues). Ces rapports sont soit obtenus à partir des règles soit sont le résultat de l'expérience. Ces rapports servent à définir progressivement toutes les dimensions de l'objet, en précisant d'abord les parties les plus chargées. Le concepteur apprend ces rapports puis, dans son activité, à partir d'une demande spécifique qui lui est adressée, il déduira par calcul les dimensions de toutes les pièces de l'objet à concevoir.

Selon Redtenbacher la méthode des rapports présente plusieurs avantages : elle est applicable à tout système de mesure ; les rapports peuvent être constants ou, dans les cas non linéaires, peuvent être associés à une table qui montre les rapports nécessaires en pratique ; le constructeur peut se contenter de mémoriser les rapports dont il a besoin ; il développe aussi, grâce à l'explicitation des rapports, une intelligence croissante des proportions harmoniques chez le constructeur. Dans beaucoup de cas la méthode donne presque immédiatement le système entier des dimensions principales et secondaires d'une construction étendue, par exemple pour les bateaux à vapeur et leurs machines. « Dans le cas que pour quelque construction on ait besoin d'un grand nombre de résultats, comme cela arrive pour de grands projets, les résultats se suivent de manière qu'ils se présentent comme on en a besoin pour l'exécution d'une construction »⁴³.

Donnons un exemple du fonctionnement de la méthode sur un cas simple : la conception des roues hydrauliques⁴⁴. Dans une première partie de l'ouvrage (chapitres 1 à 3) Redtenbacher fait un état de l'art des roues et des théories existantes pour

⁴² Les termes employés renvoient presque explicitement aux termes employés par Vitruve : « l'architecture consiste en cinq choses : ordonnance, disposition, eurythmie, bienséance et distribution » (Vitruve, *Les dix livres d'architecture de Vitruve, corrigés et traduits nouvellement en François avec des Notes et des Figures*, (Paris: Coignard, Jean-Baptiste, 1673, traduction de Perrault 1673)).

⁴³ Redtenbacher, 1848, op. cité.

⁴⁴ Redtenbacher, 1858, op. cité.

formuler progressivement un ensemble « d'équations d'effets » concernant la performance et les dimensions d'une roue hydraulique. Il s'appuie sur , les travaux de Poncelet (op. cité), Navier, Morin, mais aussi Smeaton, dont les essais sont déjà anciens - 1759- et donne également les résultats de ses propres essais. Comme l'écrit Redtenbacher, « on pourrait penser que les roues sont déjà largement connues... et qu'un traitement pratique et scientifique n'aurait plus de valeur aujourd'hui ». Or la plupart des travaux ont uniquement pris en compte la hauteur de chute, la quantité d'eau, la vitesse du cours d'eau et la vitesse à l'entrée... Par exemple l'étude de Smeaton cherche, à partir d'un dispositif expérimental, la hauteur d'arrivée de l'eau sur la roue qui permette d'optimiser la transmission du mouvement (voir figure ci-dessous).

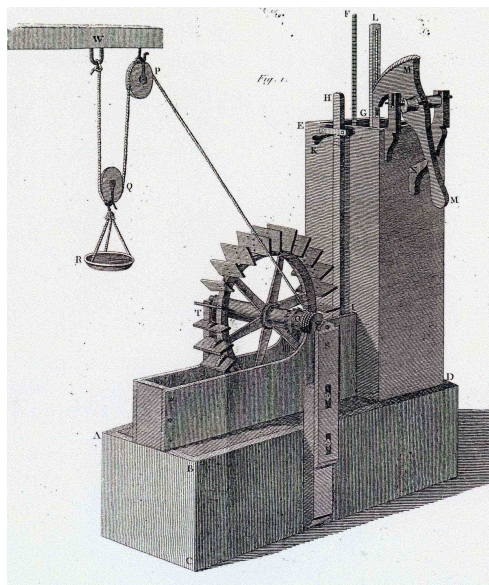


Figure 2 : le dispositif expérimental de Smeaton (1759)

Mais ces travaux ne traitent pas des aménagements particuliers de la roue ou de l'environnement dans lequel elle se trouve. Manquent ainsi des équations relatives à la taille de la roue, à son diamètre et à sa largeur, au choix des palets ou des augets, au nombre d'augets, à leur forme, à la profondeur à laquelle la roue doit plonger dans l'eau, à la qualité à apporter dans le montage et le contrôle des fuites,... Toutes ces limites font que les concepteurs ne peuvent utiliser les résultats scientifiques obtenus jusqu'à présent. C'est pourquoi, toujours dans cette première partie, Redtenbacher complète l'état de l'art par des modélisations complètes des machines existantes regroupées par grands types.

Une fois ces grands modèles descriptifs constitués, Redtenbacher passe à une seconde partie de l'ouvrage, la plus originale : la méthode des rapports. Le chapitre 4 précise ainsi la série des règles à employer pour évaluer « les formes et les dimensions spécifiques dont l'effet de la roue dépend préférentiellement dans la condition d'une réalisation parfaite de l'ouvrage ». La méthode suit tout d'abord les grandes étapes d'un dialogue fictif entre le concepteur-entrepreneur et son client. La première question à poser, selon Redtenbacher, concerne le budget que le client est prêt à consacrer à l'ouvrage, car suivant la réponse, le concepteur s'orientera soit vers une roue en bois,

soit vers une roue en métal, roues dont les rendements et les équations dimensionnantes sont très différents. Une fois le matériau choisi, viennent deux questions : la hauteur de chute du cours d'eau et le débit utilisable (ou, ce qui revient au même, la puissance attendue sur l'arbre). Le concepteur doit alors utiliser une abaque (cf. graphe ci-dessous) qui lui permet, en fonction de la hauteur et du débit, de choisir le type de roue le meilleur (ainsi un cours d'eau de montagne, à grande hauteur de chute et petit débit utilisera une roue en dessus, alors qu'un cours d'eau de plaine, à faible hauteur de chute et fort débit favorisera une roue de Poncelet,...). On va ensuite jusqu'à définir les dimensions principales (rayon, taux de remplissage, vitesse à la circonférence, volume par auget, profondeur de la roue, nombre d'augets, nombre de bras, jeu de la roue dans le coursier). A ce stade la méthode permet au concepteur de choisir une classe de roue, en évaluant les performances attendues sans encore préciser l'ensemble des dimensions.

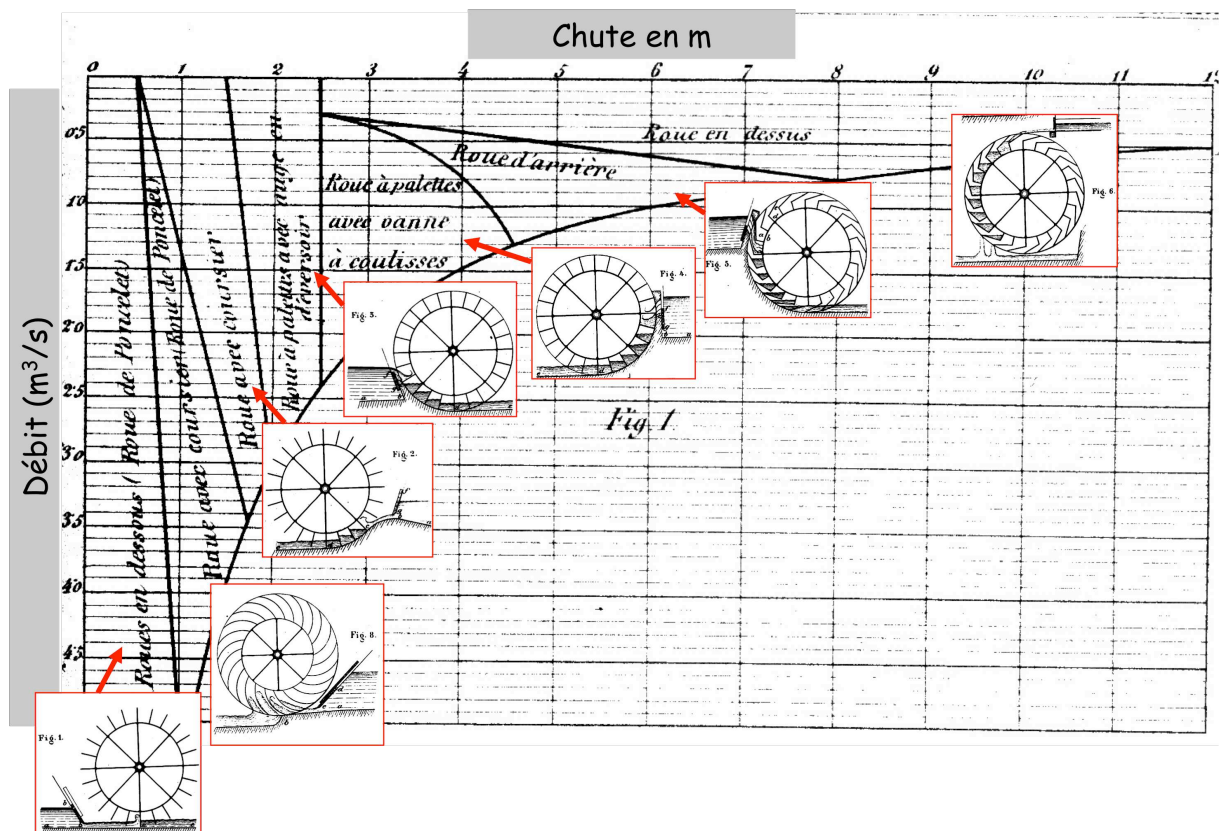


Figure 3 : Abaque pour le choix du type de roue hydraulique en fonction des conditions d'utilisation

Pour Redtenbacher, c'est, à l'époque, la partie la plus critique du raisonnement, car, constate-t-il, la plupart des roues sont mal adaptées au contexte.

La seconde partie du dimensionnement consiste à spécifier pas à pas l'ensemble des parties de l'ouvrage, en suivant des méthodes de calcul voire des plans (proposés dans l'ouvrage) qui s'assimilent en fait à des patrons (tels qu'on peut les voir en couture) : le plan est adimensionnel et précise lui aussi les rapports entre les parties en fonction d'une unité fixée connue. Il précise ensuite les modes de liaison et le niveau de

précision avec lequel l'ensemble doit être réalisé. Enfin une dernière partie concerne ce qu'on peut appeler la mise au point : Redtenbacher rappelle les formules pour le rendement théorique et la technique de mesure du rendement réel. Il invite le concepteur à comparer le rendement mesuré sur l'installation au rendement théorique et indique les moyens d'améliorer le rendement réel sur une roue presque achevée.

Sur cette deuxième partie du calcul, Redtenbacher note que les roues industrielles sont plutôt bien dimensionnées tout en insistant sur le fait que sa méthode permet de vérifier la performance, de « supprimer les imperfections » et de « rapporter toutes les incertitudes à des règles solides ».

I.B.3- L'apport de Redtenbacher : une méthode pour « travailler dans l'inconnu »

On a là une des toutes premières théories de la conception pour le monde des machines. La méthode des rapports n'est pas nouvelle : comme le reconnaît Redtenbacher elle vient des architectes. Wolfgang König note qu'avant Redtenbacher une telle méthode avait déjà été utilisée par des mécaniciens anglais et allemands⁴⁵. Mais toujours selon König, c'est à Redtenbacher que revient le mérite d'avoir introduit l'usage de la méthode à une telle échelle, dans des écoles polytechniques et dans les pratiques industrielles. Les ouvrages de Redtenbacher sont réédités plusieurs fois et traduits en français. Jusque dans les années 1880, la méthode des rapports est la base de tous les manuels et vade mecum techniques. Et malgré les critiques dont elle fera l'objet à la fin du siècle, elle restera utilisée très largement au cours du siècle suivant. La reconnaissance de l'apport de Redtenbacher est très importante dans le monde des ingénieurs allemands du 19^{ème} siècle. En témoigne les nombreux hommages de professeurs ou d'étudiants ou le parcours de ses assistants : Trick, ancien de Escher-Wyss, passera cinq ans à Karlsruhe avant de devenir ingénieur en chef de la fabrique de machines Esslingen ; son successeur au poste d'assistant, Schröter, lui aussi ancien de Escher-Wyss, travaillera aussi deux ans chez Esslingen avant de devenir professeur à Zurich. A Schröter succèdera Veith, venu lui aussi d'Escher Wyss et qui succèdera à Trick à Esslingen. Kley, ancien élève de Redtenbacher à Karlsruhe sera le successeur de Veith avant d'être consultant de la société minière « Vieille Montagne » et de devenir une autorité reconnue dans le domaine des machines de mines et de pompage. Reuleaux, élève de Redtenbacher, sera d'abord professeur à Zurich avant de prendre la responsabilité du cours de machine à Berlin où il sera le théoricien de la cinématique et l'auteur d'un ouvrage de référence directement dérivé de l'enseignement reçu de son professeur⁴⁶. Autre signe, discutable sans doute mais néanmoins symptomatique des relations qu'entretenaient Redtenbacher avec l'industrie : la dédicace « à monsieur le professeur Redtenbacher de la part d'un de ses admirateurs », faite par Edouard Beugniot, directeur de la construction de locomotives de la fabrique d'André Köchlin à Mulhouse, sur un cahier de dessins de plans de construction de locomotive. D'après

⁴⁵ König op. cité, p. 24

⁴⁶ Riedler et Moll 1877, op. cité.

Keller, qui rapporte l'anecdote, Beugniot aurait utilisé l'ouvrage de Redtenbacher « die Gesetze des Lokomotivenbaues » publié peu avant 1860⁴⁷.

Nous avons donc, avec la méthode des rapports, une théorie de la conception largement acceptée par le monde universitaire et industriel. Que nous apprend-elle sur l'origine de ce type de théorie, son objet et son rapport à l'innovation ?

3.a. Rationaliser la conception pour le rattrapage industriel

La théorie n'est ni une description des pratiques des concepteurs de l'époque (descriptive) ni une construction élaborée de façon purement spéculative. On peut dire qu'elle ambitionne une *rationalisation* de la conception : tenant compte du contexte et des enjeux elle propose, sur la base d'un modèle formel original, une voie de transformation, en fait très profonde, des pratiques collectives.

Par sa proximité avec le monde industriel, Redtenbacher connaît les capacités de conception en place, les enjeux à les dépasser (cf. le rattrapage impulsé par Nebenius, les nouvelles machines vues chez Escher-Wyss) et les contraintes dont il faudra tenir compte pour toute nouvelle méthode ; il propose une théorie qui doit permettre de former efficacement un ensemble de concepteurs compétents : avec cette méthode, « tout débutant en Maschinenbau devrait, après deux ou trois mois de formation, être en mesure de construire chaque partie de machine répondant à des conditions données ». Pour Redtenbacher la méthode est bonne car elle est facilement et rapidement enseignable et qu'un concepteur peut l'utiliser dans un grand nombre de situations et aboutir à une solution qu'il sait non optimale mais satisfaisante.

Pour autant elle ne correspond pas, loin s'en faut, aux pratiques établies. D'ailleurs la méthode de Redtenbacher ne s'impose pas facilement. D'une part Redtenbacher voit les difficultés d'un enseignement que beaucoup considèrent comme trop théorique : peu après son arrivée à Karlsruhe, il écrit : « j'espère mettre sous le nez des gens la preuve que les mathématiques ne sont pas un luxe et qu'avec elles il est possible de réaliser quelque chose en Maschinenbau, pourvu qu'on comprenne la pratique et qu'on sache ce qui est nécessaire pour la vie »⁴⁸. Il sait que la majorité des élèves risque de croire que les mathématiques sont inutiles puisque les ingénieurs de l'époque ne les comprennent pas et n'en ont jamais fait usage que lors des examens !⁴⁹ D'autre part certains professeurs refuseront d'utiliser une méthode qu'ils considèrent comme une collection sèche de formules et de tableaux sans preuve scientifique. Ainsi Kankelwitz, professeur au Polytechnicum de Stuttgart déclare-t-il à l'un de ses étudiants : « aussi longtemps que je serai dans notre école, aucun livre de Redtenbacher n'aura le droit d'être utilisé »⁵⁰. On sait que la diffusion n'en pas été moins spectaculaire, mais ces résistances témoignent de la volonté d'imprimer des formes d'action nouvelle et du décalage que la méthode imposait par rapport aux pratiques et aux doctrines établies.

⁴⁷ Voir Keller, 1910, op. cité.

⁴⁸ "ich hoffe den Leuten noch den Beweis unter die Nase zu halten, dass die Mathematik kein Luxus ist und dass man mit derselben in dem maschinenbau etwas leisten kann, vorausgesetzt, dass man vom Praktischem was versteht und genau weiss, was fürs Leben notwendig ist".

⁴⁹ Voir Fuchs, 1959, op. cité.

⁵⁰ Voir Keller, 1910, op. cité.

Ni description des pratiques ni spéculation théorique éthérée, la méthode des rapports est donc une théorie de la conception des objets de l'époque pour aider les concepteurs de l'époque à surmonter des difficultés identifiées.

3.b. Une méthode pour explorer l'inconnu à partir du connu

Quelles sont ces difficultés ? Quel est l'objet de la théorie du Maschinenbau ? C'est sans doute là l'apport majeur de Redtenbacher et peut-être aussi la plus grande source de quiproquo : il ne s'agit pas d'une théorie des objets connus mais d'une première méthode pour travailler sur des *objets inconnus*.

Les commentateurs de Redtenbacher ont été frappés par l'apparent pluralisme prôné par Redtenbacher : formules, estimation, calcul, mesures, expérimentations ou tout simplement expérience et appréciation « au doigt mouillé » sont des moyens entre lesquels il ne se prononce pas. Il insiste au contraire sur l'importance de pouvoir recourir à toutes des méthodes, à la condition de vérifier qu'il existe des rapports consistants entre les résultats obtenus. Il indique les limites de validité des lois et des formules lorsqu'elles sont connues et s'efforce de préciser les espaces sur lesquelles la connaissance n'est pas disponible (il note ainsi que dans le domaine de l'hydraulique les formules théoriques sont mal adaptées et seule une approche par des essais à grande échelle peut être d'une certaine aide)⁵¹.

Comment comprendre cet apparent éclectisme méthodologique chez le promoteur d'une nouvelle méthode ? Faut-il y voir un relativisme exacerbé ? Ou une approche contingente inaboutie ? Le formalisme C-K⁵² invite à proposer une autre interprétation de cet apparent paradoxe. La théorie C-K est un formalisme du raisonnement de conception qui consiste à séparer la connaissance, les propositions ayant un statut logique, des concepts, les propositions indécidables sans statut logique. On peut penser que la méthode de Redtenbacher ne porte pas sur le même objet que les méthodes entre lesquelles il propose de ne pas choisir. Ces dernières sont des méthodes de création de connaissances *sur des objets existants* (cf. les lois de la mécanique) : au sens de C-K elles sont en K ; la méthode des rapports est une méthode pour travailler sur des objets qui n'existent pas encore en utilisant ce qui est connu : selon la théorie C-K cette théorie modélise en fait le rapport entre l'espace C et l'espace K. Il est intéressant de voir avec quel soin Redtenbacher sépare, dans ses cours et ses manuels, la partie où il constitue des « théories complètes » des objets existants (voir les chapitres 1 à 3 sur les roues) (espace K) et la partie où il propose une démarche pour déterminer progressivement l'objet inconnu (espace C). A une modélisation des objets en K, Redtenbacher ajoute un modèle génératif, qui est le « double » conceptuel du modèle objet. Les cours classiques de mécanique laissaient penser que le modèle dans K suffisait à concevoir, comme si le modèle en C se déduisait aisément de K. La surprise est que *ce « double » a une structure très différente de celle du modèle objet* : le modèle objet établit des relations entre des attributs de l'objet alors que la méthode des rapports explicite l'ordre dans lequel les attributs déterminant l'objet doivent être ajoutés.

C'est pourquoi l'on peut dire que la méthode de Redtenbacher n'est pas une théorie des objets existants mais une théorie pour construire des objets encore

⁵¹ Redtenbacher, 1852, *Resultate*, op. cité.

⁵² Armand Hatchuel et Benoit Weil, 2002, 2003, 2009, op. cités

partiellement inconnus à partir du connu, et c'est sans doute cela qui en fait la valeur (voir schéma ci-dessous)

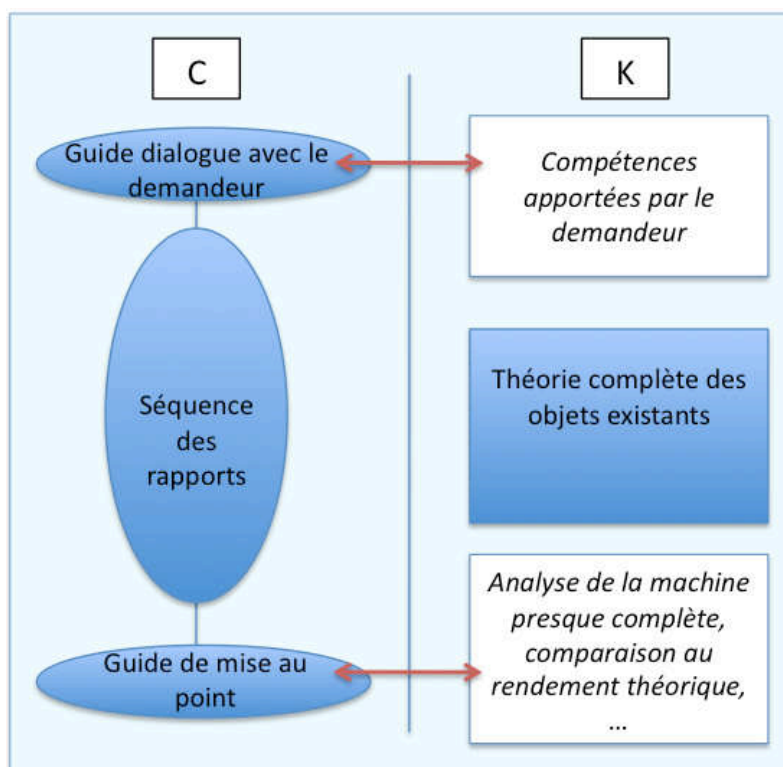


Figure 4 : Analyse de la théorie des rapports grâce à la théorie C-K

Le schéma ci-dessus montre les apports de la théorie des rapports : en K figurent les théories complètes des objets existants ; en C figurent le modèle génératif permettant de passer d'une demande sur un objet à la réalisation de cet objet. Les parties laissées sur fond blanc sont les éléments apportés par le concepteur et non intégrés dans la théorie.

Ainsi Redtenbacher écrit à propos de la méthode des rapports: « le plus grand nombre des règles et des formules ne donne pas les valeurs absolues des quantités à déterminer mais les valeurs relatives à une certaine quantité que l'on peut prendre pour unité, i.e. ces règles donnent les rapports entre les diverses grandeurs inconnues et une certaine quantité fondamentale déjà connue"⁵³. La méthode cherche aussi à rendre possible des évaluations des concepts alors même qu'ils ne sont pas complètement spécifiés (voir l'exemple de la roue hydraulique ci-dessus). Le traitement que Redtenbacher accorde au dessin est exemplaire sur ce sujet. L'approche qu'il en a est très éloignée de ce que des auteurs ultérieurs ont pu préconiser concernant la normalisation du dessin technique (voir l'entretien avec Pascal Daloz, CP stratégie Dassault Systèmes, dans ce numéro). Dans les années 1840, le recours au dessin apparaît en fait comme une technique d'exploration de l'inconnu (et non de validation comme il le sera plus tard). Pour Redtenbacher, le dessin est « un moyen pour le

⁵³ Redtenbacher, 1852, *Resultate...*, op. cité.

mécanicien d'exprimer ses idées avec clarté, précision et lisibilité", "qui coûte peu et se laisse plus facilement manipuler que le métal ou l'acier"⁵⁴.

Il nous semble finalement que la *théorie des rapports est une des premières théories des règles pour structurer l'exploration de l'inconnu en lien avec le connu*. Ces règles cherchent à éviter les court-circuits, et le recours trop systématique au connu, la réutilisation de solutions déjà connues mais en fait inadaptées. Elles obligent aussi à rester un peu plus longtemps dans l'inconnu, à des niveaux d'abstraction plus élevés que ce que permettrait la réalisation de maquettes physiques, pour envisager des alternatives à ce que l'intuition ou l'expérience passée auraient suggéré.

On notera que le formalisme C-K permet de clarifier ce que l'opposition traditionnelle entre science et art recouvre lorsqu'il s'agit de conception : la science, notamment pour Redtenbacher, correspond à la description des objets existants (du moins à certaines de leurs dimensions, notamment la mécanique) ; l'art, en revanche, concerne plutôt les objets encore inconnus. Pour Redtenbacher la méthode des rapports est une façon de faire théorie sur les objets inconnus ; c'est une méthode pour la partie artistique. En ce sens la distinction science / art ne recouvre pas la distinction théorie / pratique. La méthode de Redtenbacher se veut une théorie qui permet un meilleur dialogue entre connue et inconnu pour améliorer la pratique.

3.c. Organiser une forme d'innovation répétée ?

Quel est l'effet de la méthode en terme d'innovation ? On ne peut qu'être frappé par les revendications très limitées de Redtenbacher en la matière : la méthode sert à traiter des problèmes sur lesquels le concepteur est déjà très savant : la disposition de la machine est connue dans ses objectifs et son ordonnancement. Beaucoup des machines traitées dans ses ouvrages ne sont pas les machines de haute technologie de l'époque. Redtenbacher écrit en 1843 sur la roue hydraulique alors que la machine à vapeur de Watt a déjà plus de 60 ans !

Mais on sait aussi combien le terme d'innovation est trompeur. Pour Redtenbacher l'enjeu c'est le *rattrapage industriel*. Il s'agit en fait d'assurer la mise à disposition rapide d'une source d'énergie bon marché, performante et adaptée à l'industrie (notamment textile) alors en pleine croissance. Il ne s'agit pas même de faire une roue hydraulique « parfaite » (ce qui était plutôt le projet de Poncelet qui cherchait une roue qui transmitt à l'arbre l'intégralité de la quantité de mouvement disponible dans le cours d'eau) ; Redtenbacher cherche à donner les outils permettant de réaliser un ensemble de roues variées et adaptées de façon satisfaisante à leur environnement.

Evaluer la méthode c'est donc plutôt évaluer son « domaine de validité » i.e. à quelles formes « d'inconnu » peut-elle s'appliquer ? En particulier dépend-elle des objets et quelle part de « connu » suppose-t-elle sur les objets « inconnus » auxquels elle s'applique ? C'est ce qu'on appellera le *pouvoir génératif* de la méthode. Dans le cas présent la méthode est utilisable pour des cas de conception où existe déjà une théorie complète des objets connus associés et une série de rapports construits sur cette théorie complète. La méthode dépend donc largement des objets ; il faut une méthode spécifique pour les roues hydrauliques, les locomotives, etc... La part « connue » des objets inconnus est très importante et les objets ne doivent pas évoluer (mêmes

⁵⁴ Redtenbacher, 1852, *Prinzipien...*, op. cité.

matériaux, mêmes principes techniques, mêmes usages,...). Ces conditions apparemment restrictives laissent néanmoins la place à de nombreuses classes d'objet dans le contexte industriel du 19^{ème} siècle. La méthode permet en effet de créer de façon efficace des objets dérivés des objets « connus » mais configurés pour être adaptés à des situations singulières.

Evaluer la méthode, c'est aussi s'interroger sur les conditions requises pour son utilisation. De quelles compétences l'utilisateur est-il censé disposer et quelles actions est-il supposé savoir mener pour utiliser efficacement la méthode ? Quelles sont les conditions pour qu'il parvienne à un résultat, sachant qu'un résultat est soit la réalisation d'un produit soit un constat rapide d'impossibilité, l'enjeu étant toujours que le concepteur utilise ses capacités à bon escient) ? C'est ce que nous avons appelé le *pouvoir « conjonctif »* de la méthode : la méthode fait-elle des hypothèses fortes ou non sur les capacités du concepteur, son pouvoir conjonctif est-il faible ou fort ? Pour tous les objets auxquels elle est applicable, la méthode de Redtenbacher requiert seulement du concepteur : 1) qu'il sache dialoguer avec le client (et encore codifie-t-elle le dialogue), 2) qu'il sache calculer à partir de ratios ou qu'il sache lire des abaques, et 3) qu'il sache faire la mise au point finale (encore précise-t-elle les paramètres sur lesquels agir et les niveaux de performances à atteindre). Autrement dit la méthode ne requiert quasiment aucune production de connaissances supplémentaires au cours du processus. On notera que les connaissances du concepteur (son niveau d'expertise) sur les machines existantes sont indifférentes : soit il en dispose, soit la méthode les lui fournit ; dans certains cas, la méthode dispense même le concepteur d'acquérir un savoir complexe. On peut donc considérer que *la méthode de Redtenbacher a un pouvoir conjonctif important*.

Un des effets de la méthode est d'introduire *une forme originale de division du travail de conception*. Avant Redtenbacher un technicien concevait (et également construisait) une machine. La méthode de Redtenbacher introduit en fait un second concepteur : le concepteur du système de règles lui-même. C'est ce concepteur là qui est confronté à un univers inconnu et son action consiste à préparer autant que possible une « fonction de choix » dans une famille d'objets inconnus (l'ensemble des roues hydrauliques), une fonction de choix qui doit être facile d'emploi pour le concepteur de second rang, responsable de la conception d'un des objets de la famille (une roue). Associés à la méthode des rapports il y a aussi des règles pour les outils d'aide à la conception : la méthode doit être facile d'apprentissage, facile d'usage (selon Redtenbacher elle doit être une reconstruction rationnelle de la pratique constructive intuitive) mais elle doit aussi, on l'a vu, avoir un pouvoir expansif élevé i.e. permettre au constructeur de dépasser ses propres limites en lui ouvrant la possibilité de concevoir « intuitivement » ce qu'il n'aurait pu concevoir sans la méthode. C'est une méthode qui doit donner l'impression de suivre l'intuition tout en permettant au concepteur de résister aux « intuitions » qui le brideraient (réemploi de solutions existantes, exploration limitée,...)

I.C. Conclusion : une première théorie de l'expansion au service du développement industriel

Il faut d'abord souligner que cette première théorie de la conception de machines est le produit et le moyen d'une action publique efficace en faveur du développement économique.

Avec la méthode des rapports apparaît en fait une *théorie de l'utilisation d'un système de règles* pour concevoir des objets partiellement inconnus. Avec elle se séparent deux branches : la voie d'une théorie générale des règles sur les objets existants (empruntée notamment par les théoriciens de la science industrielle ou de la mécanique, en France) et la voie d'une *théorie de l'exploration des objets inconnus*. C'est donc un ancêtre « philogénétique » essentiel pour toutes les théories de la conception contemporaines et notamment la théorie systématique. Avec la conception systématique ce lointain aïeul partage aussi le souci de stabiliser la base de connaissance et de proposer un processus intégré qui définisse l'ensemble des étapes qu'un concepteur doit suivre pour passer de l'inconnue au connu. On a là une tentative de donner un espace propre à la conception, qui s'appuie sur les « sciences de l'ingénieur » de l'époque tout en s'en distinguant clairement.

Mais contrairement à la conception systématique, la méthode des rapports tend à figer la base de connaissances : la méthode ne permet pas l'intégration de connaissance nouvelle par le concepteur qui l'utilise ; elle laisse très peu d'espaces de conception intermédiaires à l'utilisateur. A tout brief initial la méthode fait correspondre un unique dimensionnement détaillé, l'objet final étant une réalisation de cette conception détaillée « aux tolérances près ». La conception paramétrique de Redtenbacher tend à automatiser la conception, la mise au point finale étant le seul espace dans lequel l'utilisateur reste concepteur. Au cours de laquelle il doit rapprocher la performance réelle de la roue de sa performance théorique en mobilisant des paramètres de conception identifiés dans la recette (formellement il s'agit d'ailleurs plutôt de *problem solving* que de conception). Penser des méthodes qui permettent la création de connaissance en cours de processus et qui permettent de définir des espaces d'exploration conceptuelle aux utilisateurs, tels sont les défis auxquels vont être confrontés les théoriciens allemands dans les décennies suivantes.

II. Le mouvement anti-mathématique : intégrer la modélisation scientifique au raisonnement de conception (Riedler, AEG et l'électrotechnique, 1900)

Au tournant du siècle, sont développés les éléments de machines. Ils correspondent en fait à la volonté d'intégrer les expansions de connaissances dans le raisonnement des concepteurs. Mais nous allons voir qu'ils constituent en fait une théorie de la conception incomplète.

II.A. Les limites de la méthode des rapports dans le contexte des années 1890-1900

Dans les années 70, l'Allemagne est devenue une grande puissance industrielle, unifiée par Bismarck et bénéficiant du paiement des réparations de la guerre de 1870. En 1875, les 27500km du réseau ferré en font le premier d'Europe. Ses produits se diffusent dans le monde entier. Non sans une résistance forte des concurrents étrangers, qui, en y faisant apposer le « made in Germany », tentent de stigmatiser leur piètre qualité. La qualité devient un enjeu industriel essentiel.

Depuis Redtenbacher les produits ont fortement changé. A partir des années 1860 les machines doivent tourner à grande vitesse, haute pression et haute température ; les machines à vapeur rapides imposent d'explorer des phénomènes nouveaux, plus complexes, liés au comportement en dynamique. Par ailleurs des machines d'une

nouvelle nature apparaissent : vélos, machines à coudre, moteurs à gaz, automates de tournage, nouvelles machines d'imprimerie (linotypes), turbines à vapeur... réclament des connaissances et des capacités de conception en mécanique de précision. Enfin se structure un champ de l'électrotechnique autour des objets techniques de la seconde révolution industrielle tels que les communications téléphoniques ou l'éclairage électrique. Pendant longtemps ces objets sont restés du domaine de l'instrumentation scientifique : aux yeux de ses clients l'entreprise Siemens & Halske qui les conçoit et les vend en Allemagne sera longtemps considérée comme une sorte d'Institut scientifique plutôt qu'un bureau d'étude et de fabrication. Mais dans les années 80 une entreprise comme AEG (Allgemeine Elektrizität Gesellschaft) créée par Emil Rathenau se propose d'introduire dans ces secteurs les logiques de la conception de machine, où le respect des plans et la prise en compte des contraintes de fabrications permettent des gains en qualité, la variété de masse et une amélioration régulière des capacités de conception⁵⁵.

Ces évolutions rapides des produits et des technologies (nouveaux procédés, nouveaux matériaux) conduisent aussi à des difficultés récurrentes (rupture d'arbre, de roues,...) qui soulignent que les technologies sont souvent mal maîtrisées, notamment au niveau de la conception (erreurs de dimensionnement, process mal adaptés, comportement des matériaux mal connus,...). Les litiges entre acheteurs et vendeurs se multiplient (voir notamment les débats autour de l'acier doux (Flussstahl) dans les années 1870⁵⁶). Des laboratoires d'essais de matériaux (Material Prüfanstalten) sont créés, souvent adossés à l'université (à Munich par Bauschinger en 1870, à Stuttgart par Bach en 1884, à la Technische Hochschule de Berlin par Martens en 1871)⁵⁷. A la suite du programme d'essais de traction de longue durée lancé par August Wöhler pour l'administration des chemins de fer dans les années 1860, ces laboratoires entreprennent, à partir des années 1870, d'importants programmes de recherche industrielle conduisant à une normalisation des aciers et du dimensionnement des composants dans le bâtiment. Les entreprises se transforment : elles se dotent elles aussi de laboratoires de contrôle et d'essai, qui viennent appuyer les acheteurs⁵⁸ ou le bureau d'étude. Ce dernier a quant à lui tendance à se spécialiser et à se subdiviser. Ainsi chez Siemens & Halske, au siège de l'entreprise à Charlottenburg (Berlin) en 1890, on trouve un bureau de projection, deux bureaux de construction de machines électriques, un bureau pour les centrales, une salle d'essai avec un bureau technique associé et un bureau pour le montage⁵⁹.

Dans ce contexte industriel nouveau, les méthodes et l'enseignement de la conception dans les Technische Hochschule sont l'objet de sévères critiques. Pour les comprendre il faut analyser un contexte institutionnel qui a lui aussi beaucoup évolué. La méthode des rapports s'est largement imposée. Dans l'enseignement, les professeurs qui ont succédé à Redtenbacher, notamment Franz Grashof son successeur direct

⁵⁵ Voir König, Riedler, Trendelenburg, Behringer, Wengenroth, op. cités,

⁵⁶ Voir Mauersberger, op. cité.

⁵⁷ Voir Mauersberger, op. cité.

⁵⁸ Un exemple typique, bien qu'américain, est le laboratoire de tests chimiques de Charles Dudley à la Pennsylvania Railroad, créé en 1875 avec l'objectif de définir 1) pour chaque type de tâche le matériau le mieux adapté, 2) des spécifications détaillées pour l'achat de matériaux sur le marché, 3) des méthodes de tests pour valider que les dits matériaux répondent aux spécifications et 4) conduire une recherche indépendante en lien avec la communauté scientifique avec l'objectif de réduire les coûts du chemin de fer.

⁵⁹ Voir König, op. cité.

comme professeur d'enseignement théorique de machines à Karlsruhe, ont eu tendance à favoriser les approches théoriques de la machine complète à partir des lois de la mécanique. Grashof ne reprend d'ailleurs que cette partie théorique de l'enseignement de Redtenbacher ; la partie dite de « Maschinenbaukunde » (le savoir – à prendre plutôt au sens de savoir pratique- de la construction de machine, traitant de la partie dite « constructive » des sciences des machines, i.e. l'agencement spatial des parties, les formes et le dimensionnement) est confiée à un autre professeur. Franz Reuleaux, élève de Redtenbacher, professeur à Zurich puis à Berlin, poursuivra le travail de Grashof, en cherchant à compléter la mécanique par une science rigoureuse de la transmission de mouvement, la cinématique⁶⁰.

Franz Grashof est aussi membre fondateur et directeur pendant plusieurs années du VDI, l'association des ingénieurs allemands, créé en 1856. Sous sa direction le VDI gagne une influence considérable et devient l'espace de définition de la politique de formation des ingénieurs, au détriment des états. Le VDI va promouvoir constamment les écoles polytechniques et les Technische Hochschule avec pour objectif d'obtenir pour ces institutions un statut d'université technique. Dans cette perspective les professeurs de Maschinenbau vont pousser à une scientification (Verwissenschaftlichung) de l'enseignement pour suivre l'exemple de l'université. Grashof en vient à proposer une claire division du travail entre les écoles et l'emploi, les premières offrant une formation scientifique et le second l'expérience pratique, l'expérience scientifique devant être suffisamment générique pour couvrir tous les développements techniques prévisibles dans une carrière d'ingénieur⁶¹.

Mais cette scientification a ses limites : la cinématique de Reuleaux est difficile à enseigner, néglige trop l'effet des forces et la résistance des matériaux. Par ailleurs, pour certains praticiens, la méthode des rapports a vieilli et nécessiterait d'intégrer les nouvelles capacités de production de connaissances. En témoigne Carl Justus von Bach : avant de devenir professeur à Stuttgart en 1878, Bach, formé à Karlsruhe avec Grashof puis au King's college de Londres, poursuit une carrière industrielle pendant près de 10 ans. En 1876 il est directeur général de la Lausitzer Maschinenfabrik de Bautzen où, entre autres activités, il développera de nouveaux injecteurs pour machines à vapeur et organisera aussi le développement d'une nouvelle activité dans les roues hydrauliques. A cette occasion il rédige un mémoire envoyé au VDI dans lequel il explique que les rapports établis par Redtenbacher ne pouvaient plus convenir pour concevoir ces roues et qu'il a dû procéder lui-même à de nombreux essais en laboratoire⁶². Les critiques sont donc triples : l'enseignement théorique n'est pas adapté ; la méthode des rapports doit être mise à jour ; les essais en laboratoire doivent être intégrés à l'enseignement.

Les tensions se traduisent dans les années 1890 par ce que les protagonistes eux mêmes qualifieront d'une « guerre de 7 ans » entre les « théoriciens », partisans de l'enseignement de machine suivant le modèle de Grashof et Reuleaux, et les « praticiens » qui stigmatisent la « sur-théorisation » et un enseignement trop éloigné de la pratiques. Il se revendiquent « anti-mathématiques » et veulent introduire un enseignement en laboratoire d'essai. La bataille est particulièrement violente à Berlin

⁶⁰ Voir Reuleaux et Moll, 1862 et Reuleaux, 1877, op. cités.

⁶¹ Grashof cité par König, p. 32, op. cité

⁶² Mauersberger, 1998, op. cité.

où, en 1896, après des années d'affrontement avec les praticiens menés par Alois Riedler, Reuleaux se retire du comité d'enseignement et la cinématique est supprimée des programmes. Ce qui se passe à Berlin correspond au mouvement général en Allemagne : les écoles introduisent progressivement un enseignement en atelier ou en laboratoire qui vise à montrer aux étudiants la complexité, les irrégularités et les difficultés de la pratique de la conduite de la machine. Ces laboratoires sont inspirés de l'exemple américain, que Riedler a largement étudié⁶³. Très coûteux à entretenir, ils servent à l'enseignement, à la recherche, et aux études menées par ou avec des industriels ou des administrations publiques. La création de ces laboratoires est cohérente avec la conquête d'un statut universitaire par les écoles techniques : elles peuvent ainsi montrer qu'elles font elles-aussi de la science expérimentale et de la recherche⁶⁴. C'est ainsi qu'en 1899, en même temps qu'il crée le diplôme d'ingénieur l'empereur Guillaume II accorde aux écoles techniques prussienne le statut d'université technique avec le droit de décerner le diplôme de doctorat (Promotionsrecht).

II.B. Maschinenelemente et Konstruktionsgesichtspunkte : intégrer les expansions de connaissances au raisonnement de conception

A ces transformations correspondent deux tendances majeures dans l'enseignement de la construction de machine dans les décennies 1890-1920.

II.B.1- Les éléments de machines, Bach, 1880-1920

Au cours de cette période les formations en conception de machine renforcent les enseignements d'éléments de machine. Les cours portent sur les éléments de construction apparaissant comme *importants et remplissant toujours les mêmes fonctions dans les machines*. Les chapitres classiques de tels cours sont : les éléments de machine pour l'assemblage (boulons, rivets,...), les éléments de machine pour les machines tournantes (roulements à bille,...), les éléments de machines pour la transmission d'un mouvement tournant d'un arbre à un autre (engrenages,...), pour le mouvement de translation, pour la transformation d'un mouvement de translation en un mouvement tournant et réciproquement,... Ils sont souvent précédés de chapitres introductifs sur la résistance des matériaux.

Ces thèmes étaient déjà présents dans les ouvrages de référence de Redtenbacher et de Reuleaux. Mais au cours des années 1880 leur contenu s'enrichit considérablement. Les ouvrages de Carl Justus von Bach (1847-1931), professeur à la Technische Hochschule de Stuttgart, constituent un modèle. Son livre *Elasticité et résistance* (« *Elastizität und Festigkeit* »), publié en 1889 et qui connaîtra neuf rééditions jusqu'en 1924, porte sur la résistance des matériaux et se distingue des ouvrages des prédécesseurs en faisant de la résistance des matériaux une science expérimentale (au-delà d'une simple application de la mécanique) ; Bach y rapporte des séries d'essais pratiqués par lui-même ou par d'autres professeurs, en prenant toujours garde de bien préciser *l'espace de validité* des résultats (ce qui était encore peu répandu à l'époque).

⁶³ Riedler, 1894, op. cité.

⁶⁴ Wolfgang König, "Die Technikerbewegung und das Promotionsrecht," in *Technische Universität Berlin (1799-1999)* (Berlin: 1998), 123-129

Son second ouvrage de référence, « éléments de machine », est publié et réédité treize fois entre 1881 et 1922. Il sera traduits en russe, en français et en suédois. L'ouvrage « *Elasticität und Festigkeit* » constituait la première partie des premières éditions des « *Maschinenelemente* ». Contrairement à Redtenbacher et Reuleaux, Bach veut éviter le recours aux « rapports » et favoriser « une définition des dimensions directement à partir des forces agissantes » : dans son ouvrage il s'efforce de remplacer les chiffres de la méthode des rapports par des calculs, des résultats d'essais ou des résultats issus des travaux antérieurs des entreprises. Comme il le déclare dans le journal du VDI en 1889, il souhaite appuyer les lois proposées sur les résultats expérimentaux, en évitant toute généralisation qui ne serait pas fondée sur un matériau expérimental suffisant et en mettant l'accent sur l'observation in situ des processus réels⁶⁵. Parmi les apports significatifs de Bach, Mauersberger signale par exemple le fait de distinguer clairement les déformations élastiques et plastiques et l'étude des comportements différenciés de plusieurs types de matériaux (fonte, fer forgé, acier, aciers à haut alliage, alliages légers,...) pour lesquels il analyse l'influence de la température et des traitements thermiques, de la trempe et du recuit.

Les rééditions sont autant d'*actualisations régulières* de ces résultats, en fonction du contexte économique : ainsi dans la onzième édition (1913) Bach explique qu'il avait jusqu'ici favorisé des essais avec des sollicitations limitées qui correspondaient à une tendance générale de l'industrie à préférer les longues durées de vie mais qu'il propose maintenant des résultats pour des sollicitations plus fortes car le contexte industriel porte à des changements de pièces plus fréquents. Dans l'édition suivante, de 1919, le contexte de crise économique consécutif à la fin de la première guerre mondiale, conduit à une pénurie de matériau et donc, à nouveau, à une réduction des sollicitations.

Les éléments de machines de Bach vont connaître un grand succès, dont témoigne notamment le texte de Diesel traduit ci-dessous ⁶⁶: « au début des années 1890, lorsque

⁶⁵ "In neuerer Zeit hat sich eine andere Richtung mehr und mehr Geltung zu verschaffen gewusst [...], welche zwar auch die Gesetzmässigkeit der Vorgänge zu ergründen und in das Gewand der Mathematik zu kleiden sucht, welche jedoch bestrebt ist, dies erst zu tun, nachdem sie durch den Versuch die Erfahrungsgrundlagen für die Rechnungen nach Möglichkeit sichergestellt hat, welche es ablehnt die gefundene Ergebnisse zu verallgemeinern, so lange das vorliegende Versuchsmaterial hierzu ungenügend erscheint, und welche einen Hauptwert auf die lebendige Anschauung von den thatsächlichen Vorgängen legt" (cité par König, op. cité, p. 74)

⁶⁶ „Als ich Anfang der neunziger Jahre an die Konstruktion meines Motors herantrat, versagte diese Methode [gemeint war die ungefähre Berechnung der Materialstärke nach dem System der Verhältniszahlen; Red.] vollständig. Die enormen Drücke, welche in meiner Maschine auftraten, die in solcher GröÙe bisher noch unbekannten Reibungsarbeiten in den gleitenden Teilen, zwangen mich dazu, die Beanspruchung jedes einzelnen Organs auf das genaueste zu untersuchen und die Materialfrage selbst eingehend zu prüfen. Auch nicht die nebensächliche Einzelheit dürfte dem Zufall der 'Verhältniszahl' oder der 'Sicherheitskoeffizienten' überlassen werden. Es beschlich mich das beschämende und entmutigende Gefühl, daß ich der mir gestellten Aufgabe nicht gewachsen sei. Als ich mich in meiner Hilflosigkeit in der damaligen Literatur umsah, stieß ich auf die eben erschienene 2. Auflage von Carl von Bach „Die Maschinenelemente“, die mich so begeisterte, daß ich kurz entschlossen meinen Motor liegen ließ und mit Heißhunger Bachs Buch von der ersten bis zur letzten Seite studierte, eine Arbeit, die mich - bei meiner sonstigen anstrengenden praktischen Tätigkeit - fast ein Jahr in Anspruch nahm. Diese Zeit war aber nicht verloren, denn dann konnte ich - so glaube ich jedenfalls - konstruieren; ich hatte aus dem Buche gelernt, förmlich mitzufühlen, was in jedem Maschinenorgan vor sich geht, wie ein Turner bei seinen Übungen fühlt, wie seine Glieder gedehnt, gedrückt, gebogen werden; die Maschine war mir ein lebendes Wesen geworden, das ich ganz verstand und mit dem ich mich eins fühlte. Erst dann ging ich wieder an meinen Motor und hatte nach kurzer Zeit das schöne Gefühl, daß alles klappen werde.“

je commençai la construction de mon moteur, la méthode (des rapports) était totalement défailante. Les énormes pressions qui se produisaient dans ma machine et les frottements d'un niveau jusqu'alors inconnu dans les parties glissantes, m'obligeaient à étudier la fatigue de chaque organe au plus juste et d'étudier les matériaux eux-mêmes. Cela ne pouvait être laissé au hasard des rapports et des coefficients de sécurité ». C'est dans ce désarroi que Diesel découvre la seconde édition des *Maschinenelemente* de Bach dont il dit qu'ils l'ont tant « enthousiasmé », qu'il a décidé d'abandonner son moteur et de prendre d'abord le temps de lire l'ouvrage de la première à la dernière page. « Ce temps ne fut pas perdu car ensuite je pus construire ; le livre m'avait appris à sentir ce qui, dans chaque organe de machine, suit son cours, comme un gymnaste, par ses exercices, sent comme ses membres sont tendus, comprimés ou arqués ».

II.B.2- Quelle théorie du processus ? Les « points de vue de construction »

Toutefois les éléments de machine ne remplissent qu'une partie du programme des professeurs de machine. Car Riedler comme Bach ne souhaitent pas que l'enseignement en laboratoire se fasse au détriment de l'enseignement de construction. Il s'agit de prendre en considération, comme Redtenbacher le soulignait déjà, l'atelier (process), les usines (l'usage des machines) et l'économique (les coûts). Mais aucune nouvelle méthode ne vient remplacer le processus que permettait la méthode des rapports. Même les formes les plus évoluées d'enseignement de la conception, proposées par Peter Klimentitsch von Engelmeyer⁶⁷ ou par Erkens⁶⁸, se résument à des formes d'apprentissage par projets, qui consistent à proposer aux étudiants des exercices de conception de machine de plus en plus ambitieux, depuis les pièces simples jusqu'au pièces particulières (Erkens) ou depuis l'imitation exacte d'une machine existante jusqu'à la « nouvelle construction » qui conduit à inventer de nouveaux organes (Klimentitsch von Engelmeyer).

Les professeurs s'efforcent d'organiser les apprentissages attendus de ces exercices. Ainsi dans l'entre-deux-guerres, les enseignements de conception insistent sur les « points de vues de construction » (ou les partis constructifs) (*Konstruktionsgesichtspunkt*) : la cinquième édition (1931) des éléments de machines d'un autre professeur, Karl Laudien, comporte non seulement les parties classiques mais introduit aussi des « *Konstruktionsgesichtspunkte* ». Ces points de vue de construction sont des guides pour introduire de façon simple des logiques nouvelles dans la construction (logiques de production, logique économique, voire logique fonctionnelle) : « pas plus que nécessaire », « économiser par simplification de la forme extérieure », « préférer des lignes droites plutôt que des courbes », « économiser par synthèse de parties de construction (plutôt une seule pièce que plusieurs assemblées) », « construire petit »,... Ces points de vue introduisent une logique d'évaluation multi-critères. Cette logique de l'enseignement des « *Gesichtspunkte* » avait été vraisemblablement imposée par les contraintes d'un enseignement nécessairement très synthétique dans les « *Mittelschulen* » où enseigne Laudien, dans lesquelles la formation des concepteurs se limite à 3 ans d'étude au plus.

⁶⁷ Op. cité.

⁶⁸ Op. cité.

Les industriels aussi s'intéressent à cette question. Fritz Kesselring, ingénieur principal chez Siemens-Schukert-Schaltgerät (disjoncteurs haute tension), demande ainsi en 1937 que des chaires d'enseignement de « Konstruktive Gestaltung » (mise en forme constructive) soient créées dans les toutes les technische Hochschule. En 1942, il propose un outil de pilotage du développement constructif (Lenkung der konstruktiven Entwicklung) qui consiste à organiser le suivi d'un processus de raffinement d'une idée par esquisses successives. Sur chaque esquisse sont évalués les points faibles techniques et économiques synthétisés en un couple (x, y) qui donne lieu à une décision (go / no go) et éventuellement à la recherche de voies d'amélioration (grâce à de nouvelles idées, à une révision des architectures, à un travail de recherche, à une optimisation des dimensions,...)⁶⁹.

II.C. Les théories de la conception au tournant du siècle : intégrer l'expansion en connaissances au prix du processus ?

Au tournant du siècle, on assiste donc à un renouveau des théories de la conception. A la théorie des rapports succède un corpus plus complexe, qui s'efforce d'intégrer les nouvelles formes de production de connaissance mais ne propose pas un nouveau processus de conception intégré. Voyons ce que ces efforts théoriques nous apprennent sur les logiques de génération des théories de la conception.

II.C.1- Adapter l'enseignement aux évolutions des produits et des entreprises

Tout comme la méthode des rapports, ces théories trouvent leurs origines dans les évolutions voire les tensions du monde industriel de l'époque. Les auteurs sont très proches des entreprises leader en conception de machines : si Grashof restera éloigné de l'industrie, Reuleaux est consultant pour Otto et pour Mannesmann (tubes sans soudure) ; Riedler travaille avec de nombreux industriels, et notamment Rathenau (dont il rédigera une biographie) ; Bach a longtemps travaillé dans l'industrie et aura des relations étroites avec Bosch quand il sera professeur ; Kesselring travaille chez Siemens avant d'enseigner,... Mais on ne retrouve pas la logique de rationalisation lancée par les états et les écoles des années 1840. On constate plutôt un mouvement inverse, dans lequel les entreprises poussent les technische Hochschule à s'adapter aux transformations du monde industriel, notamment pour intégrer les nouvelles capacités de conception et de création de connaissance dont la grande entreprise s'est dotée dans les années 1860 à 1900 (création de bureaux d'étude de plus en plus importants, laboratoires de recherche, bureaux des méthodes,...⁷⁰).

II.C.2- Intégrer la variété des formes de production de connaissances dans le processus de conception

Car tel est l'objet de ces théories : tenir compte de la production de connaissances et des évolutions de l'environnement industriel dans le raisonnement de conception, i.e. sortir des ratios figés de la méthode des rapports. Comme le souligne König, les

⁶⁹ Kesselring, 1942, op. cité.

⁷⁰ A noter que ces entreprises vont même intégrer précocement le design, puisque Emil Rathenau invite Peter Behrens à travailler pour AEG dès 1910... mais ce mouvement là restera encore à l'écart des formations des ingénieurs !

éléments de machines de Bach permettent d'intégrer dans la conception quatre formes de production de connaissance⁷¹:

- les résultats des laboratoires scientifiques
- les nouvelles méthodes de calcul adaptées à des problèmes techniques complexes
- l'expérimentation systématique dans des conditions réalistes
- l'accumulation des expériences issues de la pratique industrielle et sa traduction dans des règles techniques

Ce faisant ces travaux ont plutôt tendance à renforcer les règles sur les objets existants, en portant une attention particulière aux composants élémentaires communs à de nombreuses machines de cette seconde révolution industrielle. Mais ils offrent peu de prises pour utiliser ces règles sur les objets inconnus. Peu d'efforts sont faits sur les « langages de l'inconnu », ce qui explique sans doute la prégnance, tard dans le siècle, de la méthode des rapports. Aussi sophistiquées soient-elles, les nouvelles règles, pour être mobilisées sur des objets inconnus, doivent être intégrées à un raisonnement de conception. *Dans un contexte d'accroissement des règles disponibles, la question des « langages de l'inconnu », à laquelle Redtenbacher avait répondu par un modèle paramétrique, se réouvre mais ne trouve pas de réponse formelle.*

Des éléments originaux apparaissent toutefois. L'attention apportée aux domaines de validité, au-delà de la simple rigueur scientifique, permet surtout de préciser la limite du connu et de l'inconnu, A charge au concepteur de faire en sorte de rester dans les limites du connu ou de se donner les moyens d'explorer l'inconnu. Plus généralement, la stabilisation des éléments de machine a pour avantage d'offrir au concepteur un socle de connaissances facilement activables pour résoudre les problèmes classiques ; cela lui permet de se concentrer sur les *parties critiques* de l'objet. C'est ainsi qu'on peut interpréter l'enthousiasme de Diesel pour les éléments de machine de Bach. Dans un contexte où le nombre de paramètres nécessaires pour déterminer un objet (passer de l'inconnu au connu) s'accroît fortement (multifonctionnalité, exigences économiques, tolérance, robustesse, matériaux, process,...), les théoriciens proposent des moyens de réduire cette liste en « standardisant » les phases aval. Cette partie « aval » de la conception de machine, qui apparaîtrait aujourd'hui comme la conception « détaillée », libère ainsi des ressources pour la partie amont. Pour cette dernière *les langages restent en émergence* : les « points de vue de construction » cherchent ainsi à stabiliser des langages de la valeur sur les objets inconnus (Laudien) tandis qu'apparaissent des formes d'enseignements « par projet », fondés sur des séries d'exercice hiérarchisés en fonction du degré « d'inconnu » (Klimentitsch von Engelmeyer) ou des outils d'évaluation des esquisses permettant d'organiser un essai-erreur piloté, plus efficace (Kesselring) (voir schéma de synthèse ci-dessous)

⁷¹ König, op. cité.

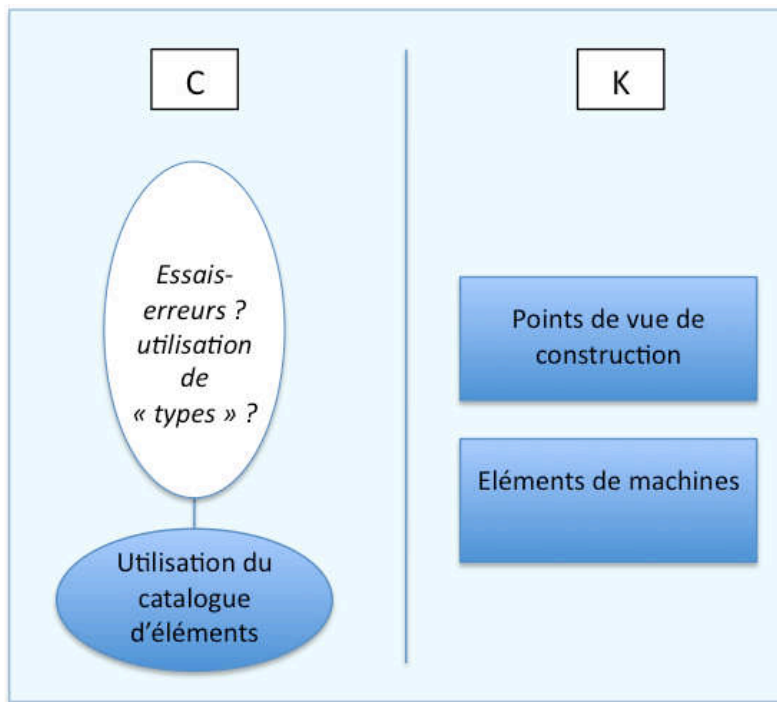


Figure 5 : Interprétation, dans le cadre de la théorie C-K, des éléments de théorie de la conception disponible vers 1920

Éléments de machines et points de vue de construction apparaissent en K, comme des connaissances sur les objets existants. Le formalisme propose peu de langages de l'inconnu.

II.C.3- Les limites d'une modularisation restrictive.

Comment les éléments de machines et les points de vue de construction contribuent-ils à la gestion de l'innovation ? De même que les travaux de Redtenbacher ne visaient pas la machine innovante mais l'amélioration globale des capacités de conception, de même les travaux des années 1880-1920 visent essentiellement à rendre robuste la conception de larges familles de produits. Ainsi ces travaux ne créent pas les nouveaux produits de la seconde révolution industrielle (électrotechnique, mécanique de précision, machines thermiques,...) mais ils contribuent à leur expansion ultérieure. Ils permettent que voient le jour des produits respectant des « conditions d'existence » toujours plus complexes (critères fonctionnels sophistiqués et multiples, montée des critères économiques,...) et ceci avec des efforts de conception si ce n'est minimaux du moins contrôlés. Les méthodes visent donc une extension du domaine de validité de la méthode des rapports (sur des nouvelles classes d'objets, et en permettant une certaine dynamique des connaissances), éventuellement au prix d'un accroissement des capacités attendues du concepteur.

Mais cette apparente extension de l'espace des objets concevables connaît aussi certaines limites. Analysons plus précisément le « domaine de validité » des méthodes disponibles pour les concepteurs au début du 20^{ème} siècle : sont concevables par ces méthodes des objets reposant sur des éléments de machine connus et suivants des points de vue de conception connus. Mais les évolutions des connaissances sur ces éléments et ces points de vue ne sont pas du ressort des méthodes elles-mêmes (tout comme les évolutions possibles des roues ou des locomotives n'étaient pas du ressort de la méthode des rapports). Ces connaissances évoluent au gré des rééditions de manuels

voire des cycles de normalisation. Comme l'ont noté certains historiens, la logique de production de connaissance au laboratoire⁷² ne conduit pas à proposer des lois nouvelles mais plutôt à confirmer des lois existantes et à étendre leur domaine de validité. Les éléments de machine sont progressivement transformés en normes qui vont s'imposer aux concepteurs. Des bureaux de normalisation voient le jour dans les entreprises (en 1890 chez Siemens par exemple) puis au niveau national (le Deutsche Normen Ausschuss du VDI débute ses travaux en 1917 et s'imposera progressivement comme instance de normalisation nationale). Ils tendent à limiter la « *schöpferische Phantasie* »⁷³, l'imagination créative, ne serait-ce qu'en limitant les moyens disponibles pour définir les composants d'un produit.

Analysons également les capacités requises du concepteur-utilisateur des méthodes. Lorsqu'il s'agit des composants élémentaires, le concepteur doit seulement savoir choisir dans un catalogue. En revanche lorsqu'il s'agit de concevoir des machines complètes, les méthodes offrent peu de moyens pour organiser le raisonnement de conception. Or concevoir des machines complètes à partir d'éléments et de points de vue connus se révèle un exercice délicat. Il est nécessaire de rajouter beaucoup de connaissances et de produire une bonne part de ces connaissances au fil du raisonnement de conception. Il faudra encore une dizaine d'années à Diesel pour mettre au point son moteur après la lecture de Bach⁷⁴ ! Ces exercices de conception exigent en fait des concepteurs « talentueux », « expérimentés », ... Autrement dit le pouvoir conjonctif des méthodes est limité.

Ces concepteurs talentueux faisant souvent défaut, et en l'absence d'une formalisation rendant efficace l'exploration initiale, les contraintes de l'aval s'imposent fortement et conduisent même à stabiliser des types de machines (« Typisierung ») pour réduire le nombre de produits offerts et limiter les produits « spéciaux » exigeant trop d'efforts de conception spécifiques. « Weniger erfinden ,mehr konstruieren » (inventer moins et construire plus) est le mot d'ordre d'AEG comme de beaucoup d'entreprises. Ainsi les méthodes du début du 20^{ème} siècle, en ne couvrant pas l'ensemble du processus de conception, ont un pouvoir conjonctif limité, de sorte que le concepteur « moyen » ne peut tirer parti du pouvoir génératif de la méthode.

Avec les éléments de machines s'ouvrait en fait la voie des règles de conception non plus de la machine elle-même mais des familles de machines. Qu'est-ce qu'une bonne famille de règles ? Qu'est-ce qu'une bonne norme ?⁷⁵ La conception paramétrique de Redtenbacher aidait à bien concevoir un produit en partant d'une « théorie complète » préexistante. Les formalismes de la fin du 19^{ème} siècle visent à bien concevoir une *famille de produits* sans la figer dans une théorie complète. Avec les éléments de machines, les concepteurs de l'époque ont favorisé *une forme de conception modulaire*,

⁷² Hans-Liudger Dienel, "Der Münchner Weg im Theorie-Praxis-Streit um die Emanzipation des wissenschaftlichen Maschinenbaus," in *die technische Universität München*, ed. Ulrich Wegenroth (München: 1993), 87-115

⁷³ Hans Tschochner, *Construire et réaliser, manuel de l'ingénieur d'études (industries mécaniques)*, trans. Traduit de l'allemand par Constant Bohn (Paris: Editions Eyrolles, 1957)

⁷⁴ Lynwood Bryant, "The Development of the Diesel Engine," *Technology and Culture* 17, no. 3 (1976): 432-446.

⁷⁵ Franz Findeneisen, *Neuzeitliche Maschinenelemente*, 3 vols. (Zürich: Schweizer Druck- und Verlagshaus AG, 1950)

distinguant un « aval » de la conception, les éléments de machine, et un « amont », les machines complètes. Cette logique modulaire restreint les expansions en « aval », où le concepteur doit s'efforcer de réutiliser les éléments connus, et les réserve à l'« amont », où le concepteur de machine complète doit structurer son raisonnement en s'aidant des « points de vue de conception » et en produisant des séries d'esquisses. On a vu que cette logique tendait en fait à restreindre les explorations, c'est pourquoi on parlera d'une *modularité restrictive*.

On notera que, quelques années plus tard, cette voie de la conception modulaire sera explorée d'une façon presque inversée, par les enseignants américains d'electrical engineering. Le plus célèbre d'entre eux, Frederic E. Terman, futur directeur du département d'engineering de Stanford et considéré par de nombreux historiens comme l'un des pères de la Silicon Valley, écrira ainsi dans les années 30 un cours de « radio engineering »⁷⁶ qui traite de l'ingénierie des systèmes radio. On y retrouve un parti « modulaire » consistant à séparer un niveau « aval », celui des modules et des composants du système (ici : amplificateurs, récepteurs, transmetteurs, émetteurs,...) et celui de l'architecture du système complet (ici : le système radio et ses caractéristiques : ondes électro-magnétiques, circuit résonant, principe des tubes à vide,...). Mais contrairement à un cours d'éléments de machine, le cours de radio engineering décrit très peu les éléments du système et insiste surtout sur les principes d'architecture du système et d'intégration des composants. Il laisse ainsi libre de larges espaces d'expansion sur les modules eux-mêmes. On pourra parler d'une *modularité expansive*. Ce cours, qui servira de référence à des générations d'ingénieurs électroniciens fige un langage des systèmes pour rendre en fait possible l'innovation sur les modules ; il est donc compatible avec les formes de croissance qui apparaîtront dans la silicon valley (entreprises innovantes proposant des modules pour des grandes entreprises responsables des systèmes).

On peut se demander pourquoi l'ingénierie électronique a emprunté la voie d'une modularité expansive quand l'ingénierie mécanique favorisait une modularité restrictive. La forme des objets techniques peut expliquer ce mouvement, la connaissance des lois et des phénomènes étant bien plus poussée et plus déterminante dans les systèmes électroniques (les équations de Maxwell et les lois de l'électronique permettant de prédire assez bien la performance d'un système radio) que dans les systèmes mécaniques (la connaissance des lois de la mécanique et de la cinématique ne suffisant pas, on l'a vu, à prédire la performance de la machine complète). On notera toutefois que le domaine de l'électrotechnique aurait peut-être pu donner lieu à la même logique de modularité expansive ; mais à l'époque les logiques institutionnelle (universitarisation des écoles techniques nécessitant une science de la conception suffisamment académique) et économique (logique concurrentielle des futures grandes entreprises du domaine comme AEG) ont précisément conduit à appliquer à l'électrotechnique les principes de conception hérités de la conception de machines.

⁷⁶ Frederick Emmons Terman, *Radio Engineering* (New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1937)

III. La théorie systématique (Hansen et al., Zeiss Jena et la mécanique de précision, 1950) : rationaliser le travail intellectuel

III.A. Mouvement de « rationalisation du travail d'esprit » et « Engpass Konstruktion »

Dès l'entre-deux guerres les besoins d'une nouvelle rationalisation de la conception se font sentir. Deux tendances de fond se dégagent : d'une part, avec la reconversion d'une économie de guerre, en 1918, et avec la crise économique de l'après-guerre puis la crise de 1929, les exigences d'une conception « économique » remettent en cause le primat du fonctionnel ; l'usine s'impose au bureau d'études. D'autre part apparaît le besoin d'une économie dans la formation des concepteurs, la voie d'une formation par l'expérience restant décidément trop coûteuse. Dans les années 20, le VDI lui-même s'est saisi de cette question, avançant les notions de *Konstruktionslehre* (enseignement de conception), *Konstruktionsregeln* (règles de construction) ou de *vergleichende Konstruktionsbeispiele* (exemples comparatifs en conception).

Ce mouvement prend son ampleur après-guerre, et plus particulièrement en république démocratique (RDA). Le contexte économique y est particulièrement difficile, après des années de guerre puis l'occupation russe. La situation de Carl Zeiss Jena, entreprise leader dans la mécanique de précision et l'instrumentation scientifique, est frappante à cet égard : après douze ans de nazisme et six ans de guerre, l'entreprise est d'abord occupée par les Américains qui envoient 146 chercheurs du centre de recherche dans la zone ouest, puis par les Russes qui démontent les machines pour les envoyer à l'est. Dans les années qui suivent, la main d'œuvre manque, soit que les scientifiques et concepteurs disponibles émigrent à l'ouest soit qu'ils soient réquisitionnés par les Russes. En outre les jeunes ingénieurs qui sortent des écoles préfèrent des activités purement théoriques et expérimentales, comme s'en plaint encore le directeur du développement de Carl Zeiss Jena dans les années 1960⁷⁷. Il est donc impératif de rationaliser la conception.

Le contexte politique est très favorable à une telle rationalisation : la RDA lance une politique fondée sur le progrès technologique ; dans les années 50, le « mouvement des innovateurs » (*Neuererbewegung*) multiplie les initiatives dans les entreprises. Si ce mouvement se limitera souvent à la multiplication de boîtes à idées éphémères, chez Carl Zeiss Jena (10242 collaborateurs en 1949, 18 000 dix ans plus tard) une des entreprises leader de RDA⁷⁸, le mouvement prend une forme plus sophistiquée. Dans cette entreprise de conception et de fabrication d'appareils de précision, la mise au point est une activité critique, et souvent très coûteuse qui se traduit par de longues phases d'ajustement à la fin des étapes de production. Les raccourcir est un enjeu essentiel. A l'occasion du « *Neuererbewegung* », l'entreprise lance un important plan de formation : deux cent cinquante personnes sont formées à la systématique des règles de mise au point (« *Systematik der Justiervorschriften* ») et aux plans de mise au point (« *Justierpläne* »), de façon à obtenir une conception la plus mature possible (« *ausgereifere Konstruktion* »). Cent trente personnes sont formés sur la systématique

⁷⁷ Cité par Heymann, 2005, op. cité.

⁷⁸ Avant la construction du mur (1961), les relations entre l'est et l'ouest restent importantes et une certaine forme de compétition reste possible. Avec le mur la RDA se tournera vers l'URSS pour ses exportations et les exigences sur les produits seront moins importantes.

du calcul de tolérance (« *Systematik der Toleranzrechnung* ») et douze se forment à l'amélioration des esquisses et l'utilisation des moyens de mise au point (« *Verbesserung von Entwurf und Ausnutzung der Justiermittel* ») avec pour objectif d'économiser 10% des heures de développement et d'esquisse. Dans beaucoup d'entreprises les méthodes nées du « mouvement des innovateurs » ne connaîtront qu'une diffusion limitée ; une exception notable est cette « systématique de conception » (« *Konstruktionssystematik* ») qui sous-tend les formations de Carl Zeiss Jena, développée par Friedrich Hansen, Werner Bischoff et Arthur Bock⁷⁹.

Quelle est cette « construction systématique » ? Les auteurs de la construction systématique ont d'abord cherché pour Carl Zeiss une méthode de mise au point rapide qui « ne consiste pas tant à accélérer le travail d'ajustement dans l'atelier qu'à améliorer l'activité des concepteurs ». Mais ils vont faire preuve d'une grande originalité pour cela. En effet, dans le contexte de « rationalisation du travail d'esprit » selon le mot de l'époque de Kurt Koloc, consultant pour Rheinmetall-Borsig et professeur de science de l'entreprise (Betriebswissenschaft und Normung), on parle plutôt de meilleure gestion des connaissances ou, comme le suggère le premier secrétaire lui-même, Walter Ulbricht, de multiplier les normes et de faire exécuter la conception par des « forces moins qualifiées ». La voie suivie par Bischoff, Hansen et Bock est d'une autre nature et représente « sans doute les travaux les plus importants en vue d'une méthode et une systématisation de la construction » selon Matthias Heymann⁸⁰. Comment augmenter la performance de tous les constructeurs ? On peut certes, disent les auteurs, assurer de meilleures conditions de travail, de meilleurs outils et une bonne organisation pour permettre une meilleure concentration mais ce n'est pas le propos : « nous nous occupons de la possibilité *d'influencer l'activité cognitive elle-même* afin qu'elle ne soit pas encombrée de chemins de traverses inutiles et que soient évitées les recherches qui ne relèveraient pas d'un mode de pensée aux finalités bien définies ».

Il s'agit donc de proposer une méthode pour rationaliser le raisonnement de conception. Mais comment concevoir cette méthode ? Les auteurs soulignent que l'observation des concepteurs talentueux, d'ailleurs rares, ne leur apprend malheureusement rien et qu'entretenir uniquement des mécanismes d'apprentissage par essai-erreur ou par compagnonnage auprès de ces mêmes concepteurs talentueux restait trop difficile. Quant à demander aux concepteurs talentueux leurs méthodes, les auteurs remarquent que ces concepteurs sont souvent incapables d'expliquer ce qu'ils

⁷⁹ Werner Bischoff est né en 1902 à Ischl, Autriche, il termine des études de Maschinenbau à la technische Hochschule de Graz en 1925 et entre en 1930 comme collaborateur scientifique (wissenschaftlicher Mitarbeiter) chez CZJ. En 1933 il est nommé directeur principal du développement et constructeur en chef. En 1953 il devient professeur à la Hochschule d'Elektrotechnik d'Ilmenau, nouvellement créée, en charge de la création de la faculté de technique des appareils de précision et d'optique et responsable de l'institut de technique des appareils de précision.

Friedrich Hansen est né en 1905 à Gotha, il termine ses études d'ingénieur en 1928 à la TH de Munich et devient ingénieur d'essai en turbines à eau chez Voith jusqu'en 1932 où il devient assistant de la chaire de Maschinen Elemente de la TH de Dantzig. De 1936 à 1941 il est concepteur chez Junker à Dessau puis de 1941 à 1948 il travaille à l'usine de machines de dessin du Dr. Graf dont il devient finalement directeur. En 1950 il devient directeur de département à Carl Zeiss Jena où il dirige le laboratoire de physique. Il devient professeur de Konstruktionslehre à Ilmenau en 1956.

La biographie de Bock est mal connue (source Heymann, 2005, op. cité).

⁸⁰ « die zweifellos wichtigsten Arbeiten zur Methodik und Systematisierung des Konstruierens », Heymann, 2005, op. cité.

font et ont appris parfois inconsciemment. Les auteurs ont donc analysé eux-mêmes le processus de pensée mis en œuvre dans les meilleures méthodes de travail. Ils ont ainsi mis au jour « les règles essentielles de la construction pour en déduire des principes directeurs valables très généralement pour le travail créatif en conception ». Ils élaborent « une systématique compacte » (*geschlossene Systematik*) de la construction « qui ne se contente pas de clarifier l'activité de construction dans toute son étendue et dans ses méthodes mais qui rend possible simultanément une rationalisation de l'activité »⁸¹

III.B. Principes de la conception systématique : structurer les langages de l'inconnu et du connu

La systématique de construction repose sur quatre notions essentielles :

- 1- Le **cœur** (*Wesenskern*, le noyau essentiel) de l'exercice de conception, aussi appelé principe fondamental (**Grundprinzip**) contient toutes les solutions possibles⁸²
- 2- Chaque solution est une **combinaison d'éléments** dont l'effet spécifique est connu
- 3- Chaque solution comporte des **manques** (ou erreur ou, pour utiliser un autre terme de statistique : un résidu) qu'il est possible de réduire à un minimum
- 4- La solution dont la somme des manques est minimale est la **solution optimale**

C'est donc un raisonnement de « régression » : pour un objet inconnu Y on cherche les variables X_i (les éléments de combinaison connus) et le modèle de régression associé $f(X_i)$ qui donnent la meilleure prédiction de comportement pour l'objet $Y=f(X_i) + \varepsilon$, au sens de la minimisation de la fonction d'erreur $\varepsilon = Y-f(X_i)$. On cherche la fonction $f(X_i)$ qui *détermine* le plus possible l'objet. Cet objectif est atteint par un ensemble d'étapes bien précises :

- 1- Etant donné un « exercice de conception » (*Aufgabe*), une réflexion préliminaire (*Vorüberlegung*) permet de déterminer le principe fondamental (formulé en quelques phrases claires).
- 2- Il faut alors élaborer des « principes de travail » (*Arbeitsprinzipien*) par combinaison d'éléments de solution intégrant des critères caractéristiques (*Konstruktionsgesichtspunkte*, des critères de valeur). Ces principes de travail ont donc trois caractéristiques principales : i) ils sont composés d'éléments de solution, i.e. de systèmes physique ou de fonctions partielles particulières, et notamment ceux qui sont nécessaires à toute solution ; ii) ces éléments de solution sont complétés par les traits caractéristiques (« *Merkmale* », des attributs de valeur) qui servent à déterminer dans la mesure du possible, des caractéristiques telles que les matériaux, les procédés, les formes, les sources

⁸¹ Werner Bischoff et Friedrich Hansen, *Rationelles Konstruieren. Ein Beitrag zur wissenschaftlichen Systematik und zur Rationalisierung der schöpferischen Ingenieurarbeit* (Berlin: VEB Verlag Technik, 1953). Cité par Heymann, 2005, op. cit., p. 155.

⁸² Cette formulation « ensembliste » est en fait celle adoptée par Anschütz et al. dans leur présentation de la théorie pour le programme de recherche Autokont dans les années 1960 à Ilmenau (F. Anschütz and others, *Beiträge zum konstruktiven Entwicklungsprozess* (Ilmenau: 1969)). Les auteurs de ce travail sont d'anciens élèves de Hansen. Nous devons ce document à Torsten Erbe, chercheur à Ilmenau, qui l'a retrouvé dans les archives de l'université. Nous l'en remercions vivement.

d'énergie,... iii) les *Arbeitsprinzipien* doivent aussi préciser les formes de couplages (*Abhängigkeitsverhältnis*, la relation de dépendance) qui lient entre eux les éléments fonctionnels.

- 3- Par une analyse des erreurs, les concepteurs identifient des principes de travail améliorés (*verbesserte Arbeitsprinzipien*)
- 4- Ils définissent ensuite tous les paramètres résiduels de façon à aboutir à un dossier de production (*Herstellunsunterlagen*)

(voir schéma de synthèse ci-dessous⁸³)

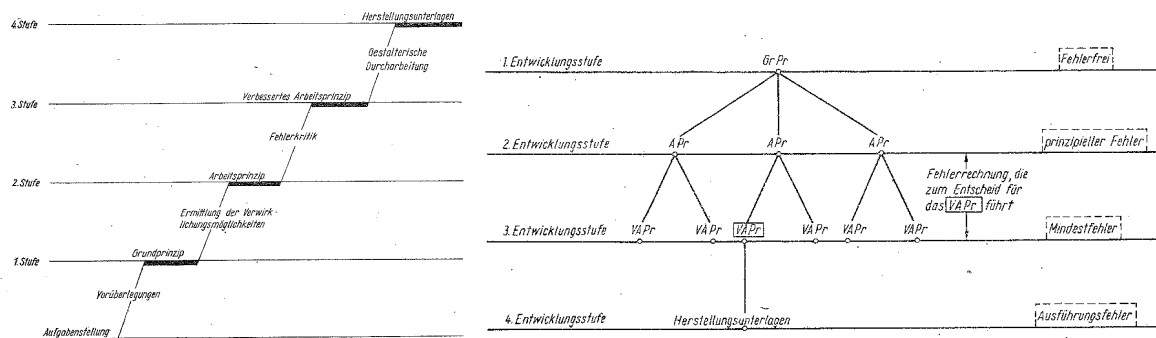


Figure 6 : Schéma de base et processus de la construction systématique, issu de Hansen, 1955, op. cité.

Ce processus appelle plusieurs commentaires :

- 1- La **détermination du Grundprinzip** est une phase originale, sur laquelle les auteurs insistent particulièrement : « bien qu'on ait déjà sous les yeux telle ou telle solution, la clarification d'un Grundprinzip est importante. Ce pas vers l'abstraction est nécessaire ; il permet de trouver des possibilités de réalisations nouvelles, malgré une expérience encore insuffisante »⁸⁴.
- 2- Le processus de conception est divisé en phases qui comportent chacune un travail **d'acquisition de connaissances spécifique**. La première phase pousse le concepteur à distinguer entre i) les spécifications à remplir dans toute circonstance, ii) les souhaits qui doivent être pris en compte de façon optionnelle, avec un surcroît de dépenses éventuel, et iii) des objectifs qui doivent être atteints dans le cadre d'un développement global mais pas nécessairement au cours de l'exercice de conception en cours. Les auteurs insistent sur le fait que ce n'est qu'à partir de la seconde phase que le concepteur doit consulter la littérature spécialisée et faire l'état de l'art. Le faire dès le début de l'exercice conduit à emprunter des voies qui certes promettent le succès mais empêchent d'explorer des solutions alternatives qui auraient pu être bien meilleures, supprimant par là même les possibilités d'un progrès constant (*fortschrittlich*). Les auteurs remarquent aussi qu'avoir identifié une variété d'alternatives

⁸³ Schéma issu de Friedrich Hansen, *Konstruktionssystematik, eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure* (Berlin: VEB Verlag Technik, 1955)

⁸⁴ Hansen, 1955, op. cité, p. 10.

améliore les capacités critiques sur les publications de l'état de l'art et les solutions connues. La troisième phase suppose une capacité d'évaluation de la robustesse des solutions pour déterminer les variations (voire les anomalies) possibles autour du comportement nominal espéré. Elle suppose aussi des capacités de calculs pour comparer les différents *Arbeitsprinzipien* améliorés.

- 3- Les auteurs soulignent que les concepteurs **doivent éviter à chaque phase d'ajouter trop vite des propriétés** à l'objet inconnu. Ainsi le *Grundprinzip* a pour objectif d'éviter que le concepteur se précipite sur la planche à dessin à peine énoncé l'exercice de conception. L'*Arbeitsprinzip* (fin de la phase 2) peut être défini uniquement à l'aide d'esquisses réalisées à main levée et ne nécessite pas un dessin technique détaillé, même si certaines interdépendances géométriques peuvent exiger un dessin respectant les proportions. Essentiellement physico-mathématique cette seconde phase ne doit pas non plus être contrainte par des considérations liées au matériau.
- 4- Un **traitement généralisé de la tolérance** : les interdépendances entre les éléments doivent être prises en compte dès la deuxième phase et non pas à la fin ; ces interdépendances déterminent la qualité finale et le temps de mise au point, non seulement pour des performances géométriques mais aussi pour des performances en optique, en transmission du signal, en tension et/ou intensité, en température,... Elles peuvent servir à améliorer significativement le produit en tirant parti, de façon précoce, des logiques de couplage ou de découplage, ou des formes de compensation. La méthode systématique s'efforce d'améliorer la détermination progressive de l'objet à tous les stades. A noter qu'en cela la méthode prend précisément en charge *l'indétermination* laissée par les éléments de machines sur les phases amont, indétermination qui avait conduit à des types rigides ou à la reconduction de solutions mal adaptées et à des mises au point coûteuses.
- 5- La méthode introduit des **formes de division du travail**. Les auteurs montrent que la conception de machines complexes peut se traiter en menant le processus de conception systématique sur des sous-ensembles et en assurant leur intégration par des boucles récursives.

Enfin les auteurs insistent : la construction systématique *n'est pas un automate* pour résoudre des problèmes. Même si le formalisme laisse penser que la conception pourrait être assimilée à un problème de contrôle-commande, les auteurs rappellent qu'il ne donne rien de plus que ce que les capacités intellectuelles humaines veulent bien lui donner.

III.C. La conception systématique : un formalisme performant pour résister à la fixation par le connu

Que nous apprend cette nouvelle théorie sur la genèse des formalismes de la conception ?

III.C.1- Le résultat d'une rationalisation du travail créatif

Comme la méthode des rapports de Redtenbacher, ce formalisme est l'objet et le moyen d'une rationalisation. Dans le cas présent cette rationalisation prend place dans une entreprise et trouve ensuite un écho sur le plan politique.

Le succès est important. D'abord chez Zeiss, où quelques exemples sont donnés par Matthias Heymann : « pour les petites constructions la méthode permet des économies de l'ordre de 25% ; pour des systèmes complexes le temps d'ajustement pouvait passer de 3 mois à 2 semaines⁸⁵ ». En DDR ensuite : la méthode connaît une diffusion rapide par l'école d'Ilmenau et par les publications. Dans les années 60 lorsque les chercheurs auront à travailler sur les outils informatiques d'aide à la conception, une grosse partie du programme de recherche Autokont sera prise en charge par d'anciens élèves à Ilmenau⁸⁶. La méthode est mobilisée autant pour l'organisation de l'entreprise (penser le rapport entre recherche et développement)⁸⁷ que pour l'enseignement⁸⁸.

Le succès est aussi international. Pour de nombreux historiens allemands, s'il est aujourd'hui admis que le flux des connaissances est plutôt allé de l'ouest vers l'est, la systématique de construction est une des rares compétences qui soient allées de l'est vers l'ouest. Dès les séminaires en RDA, un petit nombre de chercheurs ouest allemands sont invités, notamment Rodenacker. En RFA, ce n'est qu'à partir des années 60 (donc dix ans plus tard) qu'un mouvement similaire de rationalisation verra le jour. Lorsque la crise de main d'œuvre devient une crise publique, deux grands séminaires sont organisés autour de *EngpassKonstruktion* (le goulot de la conception) en 1963-64 dans lesquels, les notions de Hansen et al. transmises notamment par Rodenacker sont accueillies avec un grand intérêt. Elles seront encore transformées pour aboutir aux ouvrages de référence en conception systématique et notamment le manuel de Pahl et Beitz. Mais on retrouve dans ce dernier beaucoup de traces de ces travaux.

Comme Redtenbacher un siècle avant, la méthode ne s'impose pas sans difficultés ! Elle pose des questions pratiques difficiles : comment identifier le *Grundprinzip*, comment déduire les *ArbeitsPrinzipien* du *GrundPrinzip* ? En particulier comment le faire en utiliser les « *ordnenden Gesichtspunkte* ». La méthode apparaît trop abstraite, souvent contraire à l'intuition, impossible à appliquer dans les conditions de conception classiques, par manque de temps et de ressources. Néanmoins elle finira par s'imposer, ce qui pourrait indiquer qu'une bonne méthode n'est pas nécessairement concrète, intuitive et adaptée aux ressources disponibles ! Plusieurs éléments essentiels de la méthode sont aujourd'hui intégrés à la conception systématique telle qu'elle est enseignée dans les manuels : la notion de phase, la logique de division du travail, et surtout l'importance des principes de construction (modèles conceptuels), qui, contrairement à la notion « d'idée de solution » renvoient à l'existence d'une structure et de règles associées aux principes constructifs, i.e. une relation maîtrisée entre des langages portant sur l'objet inconnu (solution de principe) et les règles structurantes constatées sur les objets connus.

III.C.2- Des règles et des langages pour résister au « fixation effect » dans l'inconnu

Comme avec la méthode des rapports et les éléments de machine, on peut se demander quel est l'objet du formalisme. On retrouve avec Hansen et ses coauteurs les questions ouvertes par Redtenbacher : quel langage pour travailler dans l'inconnu ? Aux

⁸⁵ F. Rühl, Tagung der Konstrukteure in Berlin, Feingerätetechnik, 1955, 187-189.

⁸⁶ Voir Anschütz et al., op. cité.

⁸⁷ Voir Hansen, 1961, op. cité.

⁸⁸ Voir Hansen, 1960, op. cité.

rapports, ils substituent un nouveau processus qui étonne par sa sophistication : les auteurs précisent des objectifs intermédiaires pour travailler sur l'objet inconnu (cf. les notions de Grundprinzip, Arbeitsprinzip, d'erreur) et des formes de connaissances à utiliser spécifiquement à chaque étape : pour passer de l'Aufgabe au Grundprinzip il faut compléter l'Aufgabe et donc acquérir des connaissances sur les fonctionnalités souhaitées, leur valeur, leur faisabilité ; pour passer de l'Aufgabe aux Arbeitsprinzipien, il faut faire un état de l'art ; pour passer des Arbeitsprinzipien aux verbesserten Arbeitsprinzipien il faut faire des analyses d'erreur et de robustesse,...

La théorie se caractérise ainsi par la *mise en place d'un langage original de l'objet inconnu* et par la structuration des langages des objets connus, qui en *résulte*. On retrouve là un trait spécifique des formalismes de la conception : il ne s'agit pas d'une « engineering science » mais il s'agit bien de penser un engineering design qui s'appuie sur l'engineering science et éventuellement en rediscute les contenus et la structure (absence de certaines connaissances, hiérarchisation et mise en ordre spécifique,...). Ce faisant Hansen et ses collègues prolongent de beaucoup le travail de Redtenbacher en proposant un langage de l'inconnu enrichi ; mais ils proposent aussi une approche du connu très originale puisqu'au lieu d'avoir des « théories complètes » dans la base de connaissance, ils n'ont plus que des types de connaissances que les concepteurs auront eux-mêmes à compléter. Autrement dit le modèle objet n'est pas donné au début mais il *se constitue progressivement et peut être révisé de conception en conception*, toujours en combinant des éléments des différentes poches de connaissances identifiées par la méthode (voir schéma de synthèse ci-dessous).

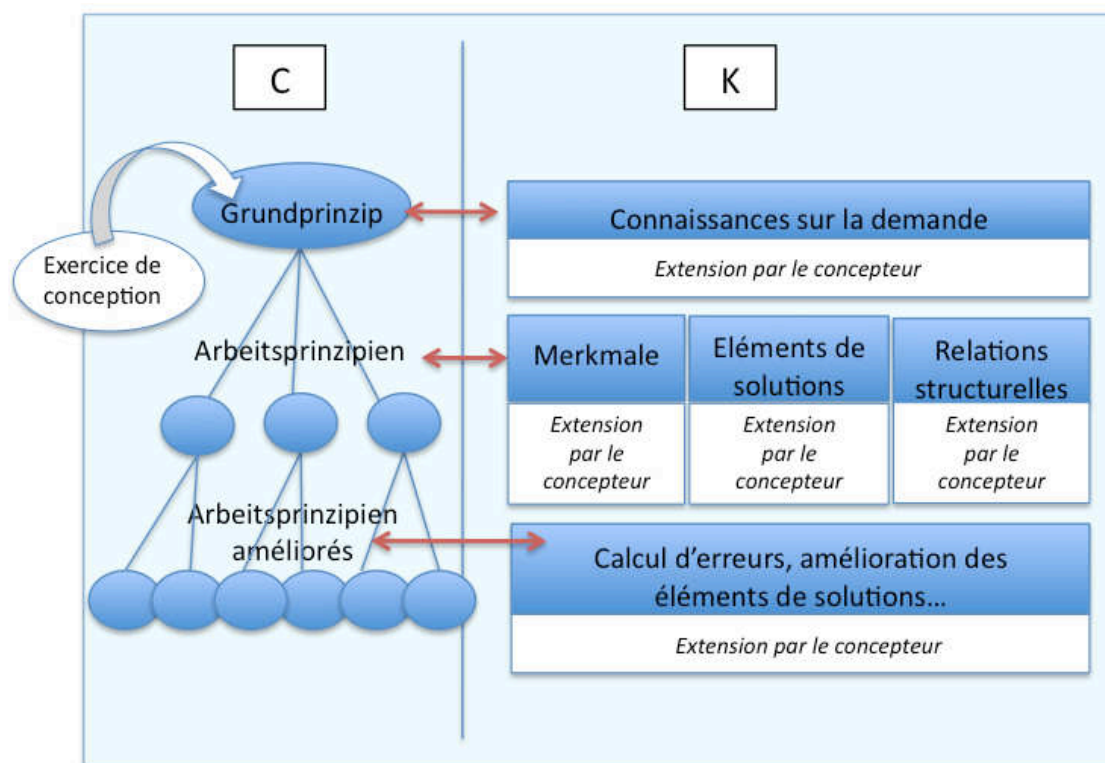


Figure 7 : Interprétation de la théorie de la conception systématique dans le cadre de la théorie C-K

Ce langage de l'inconnu est présenté par les auteurs comme une façon de résister à certaines intuitions ou certains réflexes qui brident la conception efficace. On est surpris de constater à quel point la méthode consiste à résister à ce que les psychologues contemporains ont appelé le « fixation effect »⁸⁹, i.e. l'attraction par le connu au détriment d'une exploration large de l'inconnu. La méthode pousse ainsi à résister au fixation effect en connaissances, en organisant les moments où aller chercher de la connaissance sans être bridé par elle. Elle préconise par exemple de compléter les connaissances sur l'Aufgabe (phase 1, éviter de chercher tout de suite une solution à l'énoncé, compléter d'abord l'énoncé) ou éviter de mettre trop tôt certaines connaissances (faire l'état de l'art après avoir identifié un Grundprinzip, éviter une description trop précise dans les phase 1 et 2,...) ; elle cherche aussi à supporter la résistance au cours circuit sur les objets inconnus : éviter de se focaliser trop vite sur une solution, assurer une divergence plus large grâce au détour par le Grundprinzip,...

III.C.3- Quelle innovation ?

A nouveau on doit souligner que l'objectif de la méthode n'est pas l'innovation ponctuelle mais bien l'efficacité globale des capacités de conception. Cette nouvelle théorie permet d'éviter des voies simplificatrices peu porteuses de croissance à long terme, tel qu'augmenter les cadences de l'atelier ou automatiser le travail de conception en stabilisant un plus grand nombre de règles pour pouvoir embaucher des concepteurs peu qualifiés.

Il s'agit donc d'évaluer la nature des performances que la méthode permet d'atteindre en terme de conception. On a vu que la méthode des rapports permettait de routiniser la conception de nouveaux objets à partir d'un type connu (roue hydraulique, turbine,...), elle avait donc un fort pouvoir génératif (créer de nouvelles roues encore inconnues, déduites du type initial) et un fort pouvoir conjonctif (toute nouvelle demande de roue pouvait être traitée avec une production de connaissances nouvelles très limitées – quelques calculs et de la mise au point). Les éléments de machine se voulaient une méthode adaptée à des objets industriels évoluant plus rapidement mais elle supposait soit des concepteurs très expérimentés pour concevoir des machines nouvelles en mobilisant des briques de base ; soit une stabilisation des types de machine ; autrement dit l'absence d'un processus complet donnait un pouvoir conjonctif trop limité et une incapacité du concepteur « moyen » à tirer parti du pouvoir génératif. La construction systématique, comme la méthode des rapports de Redtenbacher, s'efforce à la fois de rendre concevables des objets inconnus et d'assurer des capacités de conjonction forte, i.e. une capacité à concevoir l'objet inconnu avec un minimum d'effort de production de connaissances. Soulignons deux aspects :

- d'une part la méthode est indépendante des objets : à condition que le concepteur dispose des « points de vue », des éléments de solutions, et des rapports de dépendance entre les éléments, la méthode peut être mobilisée – contrairement à la méthode des rapports qui supposait la connaissance des rapports spécifiques à chaque classe d'objet. En ce sens le *pouvoir génératif* de la méthode est bien supérieur à la méthode des rapports. Cela explique qu'elle ait

⁸⁹ D.G. Jansson and S. M. Smith, "Design Fixation," *Design Studies* 12, no. 1 (1991): 3-11. Thomas B. Ward, Steven M. Smith, and Ronald A. Finke, "Creative Cognition," in *Handbook of Creativity*, ed. Robert J. Sternberg (Cambridge: Cambridge University Press, 1999), 189-212

pu s'imposer dans les univers les plus variés –automobile, informatique, industrie pharmaceutique, bâtiment, microélectronique,...

- d'autre part, la méthode préconise la création de connaissances en cours de processus. Elle suppose donc que le concepteur en a les capacités. On retrouve là une généralisation de la logique du laboratoire et de la recherche introduite par les éléments de machine. Cette production de connaissance est très dirigée, elle n'est autorisée qu'à certaines phases, et dans chaque cas la nature de la connaissance à rassembler est bien précisée. En outre les auteurs préconisent les formes de capitalisation qu'il faut mettre en place pour réutiliser ces connaissances dans les conceptions ultérieures, pour progressivement réduire le besoin de produire de la connaissance. On a donc un pouvoir conjonctif moins fort que dans le cas de la conception paramétrique de Redtenbacher ; la méthode suppose une capacité de production de connaissance chez le concepteur mais elle encadre aussi rigoureusement l'usage de cette « licence ». Cette évolution correspond aussi à une évolution des utilisateurs potentiels de la méthode qui, un siècle après Redtenbacher, sont devenus compétents dans le pilotage de travaux de recherche.

Le formalisme s'efforce d'étendre fortement le pouvoir génératif tout en évitant de trop perdre en pouvoir conjonctif. On obtient de la sorte une méthode de conception qui permet l'innovation à partir des systèmes de règles les plus variés (conditions très générales sur le système de règles) et supporte l'accumulation des règles nouvelles. L'analyse permet aussi de préciser les limites : le système de règle doit malgré tout comporter des « ordnende Gesichtspunkte » (des axes de valeur ordonnant) des éléments de solutions (principes techniques), des connaissances sur les relations entre les entités (connaissances d'architecture) et sur les moyens d'évaluer les manques (erreur) à tout moment. Un tel système de règle n'est pas toujours disponible. L'accumulation des connaissances est possible tant que les connaissances nouvelles sont compatibles avec les précédentes – si il apparaît une connaissance incompatible, la théorie ne dit pas comment la rendre compatible.

Conclusion : des théories de l'expansion contrôlée fondées sur des langages de l'inconnu

Sans évoquer en détail les étapes qui ont conduit aux diverses formulations de la conception systématique allemande⁹⁰, l'histoire récente présente quelques éléments saillants que nous souhaitons souligner :

- Dans les décennies qui vont suivre la théorie, développée notamment par Rodenacker, Roth, Koller, Pahl et Beitz, puis Hubka, va largement s'imposer dans les manuels, notamment dans le monde anglo-saxon à la suite de la traduction de l'ouvrage de Pahl et Beitz par Ken Wallace.
- Elle va susciter un certain nombre de débats. Un des plus violents est porté par ALbert Leyer. Considéré comme concepteur de génie, Leyer critiquera, dans les années 60, 70 et jusqu'à la conférence ICED de 1983 (International Conference on Engineering Design), la logique de « scientification » des méthodes de

⁹⁰ Nous renvoyons ici à l'ouvrage très complet de Matthias Heymann (op. cité).

construction au détriment de la créativité. Il semble que le débat ne se soit jamais réellement clarifié au cours de ces années : les manuels de conception systématique intégreront rapidement des « techniques de créativité » (voir les éditions successives de l'ouvrage de Pahl et Beitz) et pour Pahl ou Ehrlenspiel cela devait suffire pour intégrer la logique créative revendiquée par Leyer.

- Dans les années 80 plusieurs programmes de recherche vont se donner pour tâche d'étudier les concepteurs de façon empirique, souvent en partenariat avec des spécialistes de psychologie cognitive. Ces programmes (notamment celui porté par Pahl, Ehrlenspiel et Dörner et financé par la société de recherche allemande, DFG) se proposent « d'observer et de décrire les processus de conception avec les méthodes et les concepts de la psychologie cognitive et de la psychologie empirique, afin d'en tirer les fondements d'une théorie descriptive des processus de conception » (projet Ehrlenspiel et Dörner, 29 août 1985, cité par Matthias Heymann, p. 460). Ces travaux n'auront en fait pas d'effet sur le plan des théories de la conception. Comme l'écrit Matthias Heymann : « ils apporteront un grand nombre de connaissances soulignant la complexité des processus de conception ; ces connaissances vont plutôt souligner la difficulté d'une théorie générale de la conception que favoriser une telle théorie » (p. 477).
- Les études empiriques vont souvent révéler que les concepteurs n'utilisent que très peu les formalismes de façon explicite. Pour Ehrlenspiel, auteur célèbre d'un manuel de développement de produit⁹¹, le raisonnement de conception est pour une large part inconscient. On pourrait se demander si cela ne tient pas au fait même que la théorie est profondément inscrite dans les organisations, et notamment les organisations de développement de produit que décrit Ehrlenspiel : le formalisme de la conception systématique est aujourd'hui inscrit si fortement dans l'organisation que les concepteurs n'en sont plus que des rouages qui n'ont même plus de vision et de compréhension d'ensemble -ils n'en ont d'ailleurs plus besoin.
- A partir des années 2000 la question des langages de l'inconnu et du connu est réouverte ainsi que celle des théories de la conception qui connaît un renouveau important (notamment avec la théorie C-K qui nous a servi d'outil d'analyse dans ce papier). En 2008 est créé un nouveau « special interest group » (SIG) sur les théories de la conception sous l'égide de la design society.

A l'issue de ce parcours à travers l'histoire des théories de la conception réglée, nous rappelons dans le tableau de synthèse ci-dessous les caractéristiques principales des théories que nous avons analysées.

Tableau 1 : phases principales de la genèse de la conception systématique.

	Méthode des rapports (1840-...)	Elements de machines (1880-...)	Construction systématique (1950-...)
Contexte industriel	Types de produits connus	Nouveaux types de	Types de produits

⁹¹ Ehrlenspiel, K. (1995). Integrierte Produktentwicklung. Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion, Carl Hanser Verlag, München, Wien.

	(machines mécaniques) ; rationalisation pour transformer les entreprises	produits ; s'adapter aux transformations des entreprises	connus (machines de précision); rationalisation du travail d'esprit dans l'entreprise
Langage de l'inconnu (modèle génératif)	++ (rapports)	~ (Gesichtspunkte)	++ (variété de niveaux conceptuels ; notion d'erreur,...)
Langage du connu (modèle objet)	~ (théorie complète de certaines classes d'objets)	++ (Description de nouveaux objets, de matériaux, de processus,...)	~ (Merkmale, Arbeitsprinzipien, relations structurelles,...)
Pouvoir génératif (domaine de validité)	+ Pouvoir génératif fort : toutes les situations pour lesquelles il existe une théorie « complète » des objets et une séquence de rapport	Pouvoir génératif a priori élevé : toutes les situations de conception utilisant les éléments de machines connues. En pratique : pouvoir génératif faible : situations de conception à partir de machines « types ».	++ Pouvoir génératif fort : toutes les situations pour lesquelles il existe des points de vue de conception, des principes techniques, des connaissances d'architecture – <i>indépendant des objets.</i>
Pouvoir conjonctif (capacités requises pour utiliser la méthode fortes (-) vs faibles (+))	++ Pouvoir conjonctif fort : Capacités attendues : 1) dialoguer avec le client suivant le protocole dicté par la méthode 2) calculer grâce aux rapports 3) faire la mise au point à l'aide des éléments indiqués par la méthode	Pouvoir conjonctif élevé pour les phases aval (concevoir à partir d'une machine connue en optimisant des éléments de machine) ; pouvoir conjonctif faible pour les phases amont (conception de machines complètes à partir d'éléments connus)	+ Pouvoir conjonctif élevé : capacités attendues : identifier le principe fondamental, composer des principes techniques, produire la connaissance nécessaire, évaluer de façon précoce.
Caractérisation générale	<i>Modèle paramétrique</i> , à partir d'une base de règles stable	<i>Modularisation restrictive</i> , à partir d'une base de règles cumulative	Conception réglée permettant d'utiliser une très grande variété de systèmes de règles et la capitalisation de règles nouvelles

Nous pouvons conclure sur nos questions initiales en avançant les propositions suivantes :

- 1) La conception systématique qui apparaît si intuitive et naturelle aujourd'hui est une variante, particulièrement sophistiquée et performante, issue de décennies de travaux d'enseignants et d'industriels pour précisément s'extraire des intuitions trompeuses et des effets de fixation si fréquents quand on travaille sur des objets inconnus.
- 2) Ces théories ne trouvent leur origine ni dans des recherches purement formelles ni dans des études analytiques des pratiques des concepteurs : elles correspondent à des efforts de rationalisation de l'activité de conception à des périodes historiques bien précises (rattrapage industriel de l'Allemagne de la première révolution industrielle ; accompagnement de la seconde révolution industrielle ; rationalisation du travail d'esprit dans la RDA d'après-guerre). L'histoire récente (1980s) illustre, *a contrario*, les apports théoriques limités d'approches visant une théorie « descriptive » du processus de conception.

- 3) *Ces théories ne sont pas simplement des modélisations des objets existants (comme le font les sciences de l'ingénieur classiques –engineering science) mais elles sont plutôt des formalismes pour guider l'élaboration des objets encore inconnus à l'aide des objets connus.* Ce résultat permet de clarifier quelques débats récurrents sur les théories de la conception : si la conception est bien un équilibre entre « science » et « art », comme le revendiqueront toujours de nombreux praticiens, alors on ne peut pas réduire les théories de la conception à une science parmi d'autres mais bien plutôt à un formalisme reliant le connu, la science, et l'inconnu, « l'art ». Il y a donc une théorie des rapports entre science et art, entre connu et inconnu (et il peut aussi y avoir une pratique de ce rapport). C'est l'apport d'un formalisme de haut niveau comme la théorie C-K que d'éviter d'assimiler la dichotomie science / art à une dichotomie théorie / pratique.
- 4) Ces formalismes ne cherchent pas l'innovation singulière mais l'efficacité des capacités de conception. Ils peuvent s'évaluer en fonction de la variété des situations de conception qu'ils couvrent (pouvoir génératif) et des capacités qu'ils exigent de leurs utilisateurs (pouvoir conjonctifs). La conception systématique apparaît comme le formalisme ayant historiquement un pouvoir génératif et un pouvoir conjonctif particulièrement forts.

Ces propositions mériteraient d'être étayées et discutées à l'aide de travaux plus précis et plus approfondis. Elles soulèvent en particulier la question des effets économiques de ces théories. Les mouvements de rationalisation que ces théories ont supporté ont sans doute conduit à des transformations des entreprises et des écosystèmes (clusters, systèmes d'enseignement et de recherche, institutions,...). Peut-on voir avec Redtenbacher les prémisses des succès industriels allemands de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle et l'émergence de la grande entreprise à bureaux d'études contemporaine ? Les difficultés des théoriciens de la conception des années 1880-1920 et l'absence de formalismes pour penser la conception de « machines complètes » peut-il expliquer la lenteur avec laquelle une industrie des biens d'équipement des ménages (blanc, électroménager, automobile,...) se structurera dans l'entre-deux-guerres (des biens qui précisément posent des problèmes d'intégration, d'ajustement, de mise au point, de fiabilité,...) ? Doit-on voir dans cette incapacité à concevoir certains types de biens (et cette surcapacité à en concevoir certains autres) une des causes profondes de la crise de surproduction et de sous-consommation qui conduira à la crise de 1929 ?

Par ailleurs on a étudié ici un des grands phylums des théories de la conception, celui qui conduira à la conception systématique. Ce phylum se caractérise par *l'effort sur les langages de l'inconnu et leur rapport aux langages du connu*. Il existe d'autres traditions de la conception : Simon, qui avait annoncé les sciences de l'artificiel⁹², est un des exemples d'un courant plus américain qui, à partir des formalismes de la décision, c'est moins intéressés aux langages du connu et de l'inconnu, qu'aux opérateurs permettant de circuler entre le connu et l'inconnu. Il semble qu'on a là une toute autre tradition qui mériterait d'être analysée en détails.

⁹² Herbert A. Simon, *The Sciences of the Artificial*, 1991 ed. (Cambridge, MA, USA: M.I.T. Press, 1969)